

Departamento de Engenharia Informática  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade de Coimbra

Supervisão e Controlo de Sistemas Dinâmicos  
com Tolerância a Falhas – Contribuição para  
uma abordagem estruturada e robusta

Alberto Jorge Lebre Cardoso

Tese submetida à  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
para obtenção do grau de  
Doutor em Engenharia Informática



Tese realizada sob a orientação de:

*Professor Doutor António Dourado Pereira Correia*

Professor Catedrático do  
Departamento de Engenharia Informática da  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra



# Agradecimentos

Esta Tese é submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Informática. O trabalho de investigação que resultou nesta Dissertação teve a supervisão do Professor Doutor António Dourado Pereira Correia, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Informática da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, e foi desenvolvido no Centro de Informática e Ciências da Universidade de Coimbra (CISUC).

Quero expressar o meu agradecimento profundo e sincero a todas as pessoas e instituições que de alguma forma contribuíram para a realização do trabalho de investigação que culminou nesta Dissertação.

Ao Professor Doutor António Dourado, agradeço reconhecidamente o apoio e compreensão que me dispensou, a criação de condições para o desenvolvimento deste trabalho, a oportunidade de pertencer ao grupo que dirige e a amizade resultante de uma caminhada já com vários anos.

Como docente no Departamento de Engenharia Informática (DEI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), quero manifestar o meu agradecimento aos Conselhos Directivo e Científico da Faculdade, na pessoa do seu actual Presidente, Professor Doutor João Gabriel Silva, por todo o apoio concedido para a prossecução deste trabalho de investigação.

À Comissão Científica do Departamento de Engenharia Informática, na pessoa do seu actual Presidente, Prof. Doutor Henrique Madeira, a minha gratidão por todo o apoio, incentivo e compreensão. Sendo este um trabalho que resultou da investigação realizada como membro do CISUC, agradeço à Comissão Científica pelas condições disponibilizadas para a realização deste trabalho, nomeadamente pelo apoio financeiro para a participação em diversas Conferências.

Este trabalho foi parcialmente realizado no âmbito do projecto ALCINE, financiado pelos programas FEDER da União Europeia e PRAXIS XXI da Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT), e contou igualmente com financiamentos do POSI –

Programa Operacional da Sociedade de Informação da FCT, da Fundação Calouste Gulbenkian e da Fundação Oriente.

Uma parte do trabalho experimental foi realizado na Plataforma Solar de Almería (PSA) em Espanha, no *European Test Center for Solar Thermal Energy Applications*, no âmbito da actividade “*Improving Human Potential*” do programa da União Europeia “*Enhancing Access to Research Infrastructures*” (IHP-ARI integrado no EU-DGXII *Dish/Stirling facilities*) e do programa europeu “*Training and Mobility of Researchers*” (TMR). Aos técnicos da PSA deixo o meu agradecimento pelo acolhimento e apoio prestados.

Tendo participado em *Workshops* no âmbito do programa COSY – *Control of Complex Systems*, promovido pela *European Science Foundation*, ESF-COSY-Theme 2, e em *Vacation Schools*, organizadas no âmbito da *Research Training Network DAMADICS (Development and Application of Methods for Actuator Diagnosis in Industrial Control Systems)*, financiada pelo V Programa-quadro da Comissão Europeia, apresento os meus sinceros agradecimentos aos responsáveis pelo programa COSY e pela rede DAMADICS.

Também quero agradecer ao Professor Ron J. Patton pela possibilidade de efectuar uma visita ao Laboratório do *Control & Intelligent Systems Engineering Research Group* do Departamento de Engenharia da Universidade de Hull (Inglaterra).

Ao Grupo de Computação Adaptativa do CISUC, do qual sou membro, desejo expressar um agradecimento muito especial pela forma como tem sido vivido este percurso como grupo, pelos incentivos à concretização deste trabalho, pelo relacionamento pessoal e profissional e, de modo especial, pela amizade. Em particular, gostaria de agradecer à Doutora Bernardete Ribeiro e aos Doutores Jorge Henriques, Paulo Gil e Paulo de Carvalho, pelos diversos contributos para a concretização deste trabalho, nomeadamente, para a revisão deste documento. Também o meu agradecimento aos Mestres Carlos Vaz e Amâncio Santos pela sua disponibilidade no apoio às solicitações de índole informática.

Agradeço também aos Professores e Colegas do DEI e do CISUC pela relação de amizade.

Aos funcionários do DEI ou que trabalham no DEI, o meu muito obrigado.

Aos meus amigos e aos meus colegas de curso, em especial aos Doutores Jorge Bernardino, Joaquim Delgado e Rafael Bidarra, o meu agradecimento pela sua amizade e por ajudarem a recheiar a minha vida com momentos de alegria e de felicidade.

Ao terminar este trabalho não poderia deixar de agradecer profundamente aos meus pais, ao meu irmão e a toda a minha família por tudo o que me têm dado e pela forma como têm contribuído para a minha felicidade.

Por fim, quero agradecer de uma forma muito especial à Manela, minha esposa, e aos meus filhos Sara Filipa e Francisco Miguel, pelo amor, apoio, incentivo e compreensão que sempre me têm manifestado, esperando poder vir a recompensá-los por algumas solicitações não atendidas.

*Alberto Jorge Lebre Cardoso*

À Manela, à Sara Filipa, ao Francisco Miguel

e à minha família.





# Resumo

O trabalho de investigação que resultou nesta Dissertação teve como principais objectivos o desenvolvimento de sistemas de supervisão e controlo de sistemas dinâmicos com tolerância a falhas e a sua aplicação em processos laboratoriais. Estes processos apresentam características não lineares e são representativos de sistemas de maior dimensão e complexidade, existentes, por exemplo, em processos industriais, sistemas de protecção ambiental ou equipamentos médicos.

Este trabalho pretende contribuir para a formulação estruturada de todo o sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas, englobando os projectos do controlador robusto com tolerância passiva a falhas, do módulo de diagnóstico de falhas, do módulo de reconfiguração do sistema de controlo com tolerância activa a falhas e do módulo de supervisão.

Os sistemas de supervisão e controlo tolerantes a falhas são sistemas de controlo em malha fechada que podem tolerar falhas, ou mesmo avarias, em sensores, actuadores e em componentes do processo, garantindo fundamentalmente a estabilidade do sistema e um certo grau de desempenho, podendo apresentar alguma degradação dentro de limites aceitáveis. Estes sistemas podem ser classificados como passivos ou activos. No primeiro caso, o sistema de controlo é projectado de forma a atenuar o efeito das falhas de menor dimensão e que não determinem a avaria do componente. No caso dos sistemas activos, usando a informação obtida pelo módulo de diagnóstico de falhas, o sistema de supervisão é responsável pela activação de mecanismos de acomodação da falha, da reconfiguração do sistema ou mesmo da interrupção do funcionamento do processo, dependendo da gravidade da falha.

A abordagem proposta neste trabalho considera que o processo dinâmico sujeito a falhas é descrito por um modelo global não linear e que o projecto do sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas pode ser baseado num ou mais modelos lineares com incertezas que englobam os erros de modelização e de linearização em torno de um ou mais modos de funcionamento. Estes podem resultar de características do processo significativamente não lineares e/ou de modos de funcionamento do processo em situação de falha.

Para o projecto do controlador com tolerância passiva a falhas e do sistema de diagnóstico de falhas é considerada uma abordagem baseada no modelo do processo considerando uma extensão da especificação tradicional de um problema de controlo robusto, em que as especificações e as incertezas são formuladas em  $H_\infty$  e a síntese é efectuada usando o valor singular estruturado,  $\mu$ .

O sistema de supervisão e controlo com tolerância activa a falhas proposto, utiliza um módulo supervisor que gera as decisões necessárias para garantir a estabilidade, o desempenho e a tolerância a falhas do sistema em malha fechada. A abordagem considera, essencialmente, um mecanismo baseado em lógica difusa para gerir a informação recebida do processo, do módulo de diagnóstico e do supervisor humano.

O sistema inclui um módulo de identificação de falhas que, usando os resíduos resultantes da detecção e isolamento de falhas e da validação das saídas medidas, produz a informação necessária à localização do componente em falha e à avaliação do seu grau de severidade. Para concretizar as decisões do supervisor, o módulo executor gera as acções correctivas para a acomodação das falhas. Explorando as redundâncias analíticas e físicas do processo, propõe-se um mecanismo de reconfiguração baseado em sensores e actuadores virtuais, para as situações em que ocorram falhas graves. O sistema de controlo é constituído por um conjunto de controladores projectados para cada modo de funcionamento. Uma das tarefas do supervisor consiste em seleccionar o controlador adequado ao modo de funcionamento identificado.

Os resultados obtidos pela aplicação das metodologias passivas e activas em processos reais (o “Pêndulo Invertido”, o Campo de Colectores Solares da Plataforma Solar de Almería e o processo “Três-Tanques”) perspectivam a sua aplicabilidade em processos mais complexos.

**Palavras-chave:** Sistemas dinâmicos, modelos lineares com incertezas, detecção e isolamento de falhas (FDI), controlo tolerante a falhas (FTC), controlo robusto, comutação de controladores, acomodação de falhas, reconfiguração de sistemas.

# Abstract

The main purposes of the work presented in this Thesis are the development of a model based Fault-Tolerant Control System (FTCS) for dynamical processes and its implementation on nonlinear laboratory processes, representative of systems of higher dimension and complexity, integrated in industrial process, environmental protection systems or in medical equipments.

This work aims to give a contribution for a structured formulation of a fault-tolerant control system, including the design of a fault detection and diagnosis module, a robust controller with passive fault tolerance, a control reconfiguration module with active fault tolerance and a supervisor module.

The fault tolerant supervisory control systems are feedback control systems with the property of tolerance to faults, or even failures, in sensors, actuators or process components, assuring fundamentally the system stability and a certain performance degree, showing possibly some performance degradation within acceptable limits. These systems are usually classified as passives or actives. In the former case, the control system is designed in order to attenuate the effects of faults with small magnitude and without an evolution to a failure of the component. In active systems, the supervisory system makes use of the information from the fault diagnosis module to activate the fault accommodation mechanisms, to reconfigure the system or even to switch off the process, depending on the fault severity.

The proposed approach considers a nonlinear global model to describe the process dynamics and the design of the supervisory control system based linear models with uncertainty describing the errors of modelization and linearization around one or more nominal operation modes. These operation modes may result from significantly nonlinear process' characteristics and/or from operation modes in faulty cases.

In the passive case, a model-based approach is used to estimate the system's outputs and to synthesise the robust controller. The design objectives and the system's uncertainties are formulated in terms of  $H_\infty$  specifications and the problem is solved using the structured singular value,  $\mu$ .

In the active case, the fault tolerant control system uses a supervisor subsystem to select the suitable actions in order to preserve the system's stability and performance and to assure fault tolerance for the closed loop system. The proposed approach considers a fuzzy-logic implementation to handle the information received from the process, the fault diagnosis subsystem and from the human supervisor. The system includes another subsystem for fault identification based on residuals generated by the fault detection and isolation module. An executor is considered to carry out the remedial actions in order to achieve fault accommodation. The supervisor exploits also the physical and analytical redundancies to reconfigure the control system whenever severe faults are identified, using virtual sensors and virtual actuators. Concerning the control system, it is defined by a set of controllers designed for each operation mode. One of the supervisor's tasks is to identify the operation mode and to select the suitable controller, accordingly.

The results obtained with the application of the proposed passive and active approaches in nonlinear real processes (the Inverted Pendulum apparatus, the Distributed Solar Collector (DSC) field of the Plataforma Solar de Almería and the Three-Tank benchmark plant) give good perspectives for its usability in more complex plants.

**Keywords:** Dynamical systems, uncertain linear models, Fault Detection and Isolation (FDI), Fault Tolerant Control (FTC), robust control, switching control, fault accommodation, system reconfiguration.

# Índice Geral

1.	Introdução .....	1
1.1	Motivação .....	3
1.2	Objectivos e Contribuições.....	5
1.3	O Sistema de Controlo Tolerante a Falhas Proposto .....	7
1.4	Os Casos de Estudo .....	8
1.5	Organização da Tese.....	9
1.6	Convenções e Meios.....	10
1.7	Publicações .....	11
2.	Supervisão e Controlo Tolerante a Falhas .....	13
2.1	Introdução.....	13
2.2	A Importância da Tolerância a Falhas .....	14
2.3	O Sistema de Supervisão .....	18
2.3.1	A Terminologia .....	24
2.4	Classificação das Falhas .....	25
2.5	Modelização das Falhas.....	27
2.5.1	As Falhas Multiplicativas .....	27
2.5.2	As Falhas Aditivas.....	30
2.5.3	As Falhas nos Componentes.....	31
2.6	Principais Componentes de um FTCS.....	32
2.7	O Estado de Arte em Controlo Tolerante a Falhas.....	35
2.7.1	Métodos Passivos em Controlo Tolerante a Falhas.....	35
2.7.1.1	Controlo Confiável .....	36
2.7.1.2	Controlo Robusto.....	36

2.7.2	Métodos Activos em Controlo Tolerante a Falhas.....	37
2.7.2.1	Método da Pseudo-Inversa.....	37
2.7.2.2	Atribuição da Estrutura Própria.....	39
2.7.2.3	Múltiplos Modelos.....	40
2.7.2.4	Comutação de Controladores.....	41
2.7.2.5	Sistemas Integrados de FDD e de FTC.....	41
2.7.2.6	Seguimento de Modelo.....	42
2.7.2.7	Controlo Adaptativo.....	43
2.7.2.8	Modelo de Controlo Preditivo.....	44
2.7.2.9	Análise do FTCS.....	45
2.7.2.10	Reconfiguração/optimização <i>online</i> .....	46
2.7.2.11	Estimação dos estados/saídas tolerante a falhas.....	46
2.7.2.12	Neuro-Difusos.....	47
2.7.2.13	Orientados para a Aplicação.....	47
2.7.3	Casos de estudo.....	48
2.8	Enquadramento da Abordagem Proposta.....	48
2.8.1	Falha Grave num Sensor.....	50
2.8.2	Falha Grave num Actuador ou num Componente do Processo.....	51
2.8.3	Tarefas Principais do Supervisor.....	51
2.9	Conclusão.....	52
3.	Diagnóstico e Tolerância Passiva a Falhas.....	53
3.1	Introdução.....	54
3.2	Modelização do Sistema Dinâmico.....	54
3.2.1	Abordagens de Modelização.....	55
3.2.2	Formulação do Problema de Identificação.....	56
3.2.3	Redes Neurais na Identificação de Sistemas Dinâmicos.....	58
3.3	Modelo Linear com Incertezas.....	61
3.3.1	Incertezas Não Estruturadas.....	62
3.3.2	Incertezas Paramétricas.....	64
3.3.3	Incertezas estruturadas.....	65
3.3.4	Transformações Lineares Fraccionárias.....	65
3.4	Controlo Robusto com Tolerância Passiva a Falhas.....	68
3.4.1	Estabilidade nominal do sistema.....	69
3.4.2	Desempenho nominal do sistema.....	70
3.4.3	Estabilidade Robusta.....	72
3.4.4	Valor Singular Estruturado.....	75
3.4.5	Desempenho robusto.....	78

3.5	Estrutura Proposta para o Sistema de Controlo e de Diagnóstico de Falhas.....	80
3.5.1	Representação dos Objectivos.....	83
3.5.2	Estrutura das incertezas.....	84
3.6	Análise e síntese $\mu$ .....	85
3.7	Conclusão.....	87
4.	Controlo com Tolerância Activa a Falhas.....	89
4.1	Introdução.....	89
4.2	A Arquitectura do Sistema.....	91
4.2.1	Nível de Processo.....	93
4.2.2	Nível de Execução.....	95
4.2.3	Nível de Supervisão.....	96
4.3	Reconfiguração do Sistema.....	96
4.3.1	Módulo de Reconfiguração.....	97
4.3.2	Definição do Problema de Reconfiguração.....	98
4.3.3	Falhas e Reconfiguração.....	100
4.3.4	Sensor Virtual.....	102
4.3.5	Actuador Virtual.....	106
4.3.6	Análise das Abordagens.....	110
4.4	Sistema de Supervisão.....	110
4.4.1	Mecanismo de Supervisão.....	111
4.4.2	Supervisão com Lógica Difusa.....	111
4.4.3	Simplificação do Supervisor.....	112
4.4.4	Validação da Referência.....	113
4.4.5	Diagnóstico de Falhas.....	114
4.5	Conclusão.....	115
5.	Casos de Estudo.....	117
5.1	O Sistema computadorizado de aquisição e de actuação.....	118
5.2	Processo “Pêndulo Invertido”.....	119
5.2.1	Descrição do Processo.....	120
5.2.2	O Modelo do Processo.....	122
5.2.3	Controlo Tolerante a Falhas.....	125
5.2.4	Resultados.....	129
5.2.5	Análise do Desempenho do Sistema.....	132

5.3	Campo de Colectores Solares.....	132
5.3.1	Descrição do Processo.....	133
5.3.2	Modelo do Processo .....	135
5.3.3	Sistema de Supervisão e Controlo.....	136
5.3.4	Resultados .....	141
5.3.5	Análise do Desempenho do Sistema .....	147
5.4	Processo “Três Tanques” .....	148
5.4.1	Descrição do Processo.....	148
5.4.2	Modelo do processo .....	152
5.4.3	Supervisão e Controlo Tolerante a Falhas.....	154
5.4.4	Resultados Obtidos.....	155
5.4.5	Análise do Desempenho do Sistema .....	160
5.5	Conclusão .....	161
6.	Conclusão .....	163
6.1	Conclusões .....	163
6.2	Trabalho Futuro.....	165
	Apêndice A – Terminologia de Controlo Tolerante a Falhas .....	167
	Apêndice B - Definições e Princípios Básicos de Controlo Robusto .....	175
B.1	Modelização .....	175
B.2	Pólos.....	176
B.3	Zeros.....	176
B.4	Normas de vectores e de matrizes .....	178
B.5	Decomposição em Valores Singulares.....	180
B.6	Normas no espaço de funções .....	183
B.7	O valor singular estruturado.....	184
B.7.1	Propriedades de $\mu$ .....	185
B.7.2	O número de condição e a matriz de ganhos relativos.....	186
	Bibliografia.....	187



# Lista de Figuras

## Capítulo 2:

Figura 2.1: Representação de um processo em malha aberta sujeito a falhas.....	18
Figura 2.2: Diagrama de um processo em malha fechada sujeito a falhas.....	19
Figura 2.3: Monitorização e protecção automática na supervisão clássica de um processo dinâmico.....	20
Figura 2.4: Diagrama geral de um sistema de supervisão de um processo dinâmico.....	22
Figura 2.5: Localização das falhas num sistema controlado.....	25
Figura 2.6: Tipo de falhas em função das suas características temporais.....	26
Figura 2.7: Tipo de falhas em função da sua modelização.....	27
Figura 2.8: Efeito de instabilidade provocado por uma falha multiplicativa num sistema.....	29
Figura 2.9: Representação dos principais componentes de um FTCS.....	33

## Capítulo 3:

Figura 3.1: Representação de um processo dinâmico.....	54
Figura 3.2: Representação esquemática da rede de Elman modificada.....	60
Figura 3.3: Configuração $M-\Delta$ standard.....	62
Figura 3.4: Configuração da incerteza como perturbação aditiva.....	62
Figura 3.5: Configuração da incerteza como perturbação aditiva inversa.....	63
Figura 3.6: Configuração da incerteza como perturbação multiplicativa à entrada.....	63
Figura 3.7: Configuração da incerteza como perturbação multiplicativa à saída.....	63
Figura 3.8: Configuração da incerteza como perturbação multiplicativa inversa à entrada.....	64
Figura 3.9: Configuração da incerteza como perturbação multiplicativa inversa à saída.....	64
Figura 3.10: Representação da incerteza paramétrica.....	65
Figura 3.11: Configuração standard $M-\Delta$ com explicitação da matriz de interconexão $M$ .....	66
Figura 3.12: Configuração de uma transformação linear fraccionária inferior (LLFT).....	66

Figura 3.13: Diagrama de blocos para verificação da estabilidade interna.....	70
Figura 3.14: Diagrama simplificado dum sistema de controlo. ....	71
Figura 3.15: Uma configuração de realimentação. ....	72
Figura 3.16: Configuração com perturbação aditiva. ....	73
Figura 3.17: Configuração standard $M$ - $\Delta$ para análise do desempenho robusto.....	78
Figura 3.18: Configuração standard $M$ - $\Delta$ com bloco de incerteza fictícia $\Delta_p$ .....	79
Figura 3.19: Configuração standard $M$ - $\Delta$ com controlador $K$ .....	81
Figura 3.20: Configuração standard $M$ - $\Delta$ com controlador generalizado $K$ e incertezas fictícias. ....	82

## Capítulo 4

Figura 4.1: Diagrama da arquitectura global do sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas. ....	92
Figura 4.2: Reconfiguração do controlador em resposta a falhas. ....	97
Figura 4.3: Reconfiguração da malha de controlo para falhas nos actuadores ou nos sensores. ....	98
Figura 4.4: Representação linear do processo nominal.....	99
Figura 4.5: Representação do sistema nominal em malha fechada.....	100
Figura 4.6: Reconfiguração usando um sensor virtual.....	104
Figura 4.7: Reconfiguração usando um actuator virtual. ....	107
Figura 4.8: Mecanismo principal do supervisor.....	111
Figura 4.9: Avaliação de resíduos com um limiar adaptativo.....	115

## Capítulo 5

Figura 5.1: Medição de uma grandeza física usando um sistema computadorizado de aquisição.....	118
Figura 5.2: Acção sobre uma grandeza física usando um sistema computadorizado de actuação.....	119
Figura 5.3: O processo laboratorial “Pêndulo Invertido”.....	120
Figura 5.4: Representação esquemática do processo “Pêndulo Invertido”.....	121
Figura 5.5: Diagrama do processo “Pêndulo Invertido”. ....	121
Figura 5.6: Modelo simplificado do “Pêndulo Invertido”.....	123

Figura 5.7: Configuração para o projecto simultâneo do controlador robusto e do detector de falhas no “Pêndulo Invertido”.....	126
Figura 5.8: Resposta temporal do Pêndulo Invertido em malha fechada a variações em degrau da referência da posição do carro, sem existência de falhas.....	130
Figura 5.9: Resposta temporal do Pêndulo Invertido em malha fechada a variações em degrau da referência da posição do carro, com uma falha no actuador ( $f_a = -2N$ ), entre $t = 40s$ e $t = 70s$ .....	130
Figura 5.10: Resposta temporal do Pêndulo Invertido em malha fechada a variações em degrau da referência da posição do carro, com uma falha no sensor que mede a posição do carro ( $f_{s1} = 0.2m$ ), entre $t = 40s$ e $t = 70s$ .....	131
Figura 5.11: Resposta temporal do Pêndulo Invertido em malha fechada a variações em degrau da referência da posição do carro, com uma falha no sensor que mede a posição angular do pêndulo ( $f_{s2} = 2^\circ$ ), entre $t = 40s$ e $t = 70s$ .....	131
Figura 5.12: Imagens do Campo de Colectores Solares.....	133
Figura 5.13: Diagrama esquemático do Campo de Colectores Solares.....	134
Figura 5.14: Diagrama do Campo de Colectores Solares.....	134
Figura 5.15: Estrutura de supervisão e controlo do Campo de Colectores Solares.....	137
Figura 5.16: Funções de pertença para a radiação solar, $I_{rad}$ , e para a temperatura de referência, $T_{ref}$ .....	138
Figura 5.17: Exemplo do funcionamento do mecanismo difuso.....	139
Figura 5.18: Agrupamento de controladores.....	140
Figura 5.19: Simulação 1: comportamento do processo usando um controlador PID fixo ( $K5$ ).....	142
Figura 5.20: Simulação 2: comportamento do processo usando a estratégia de supervisão proposta.....	142
Figura 5.21: Simulação 2: evolução da radiação solar e do controlador seleccionado (6/Julho/1998).....	143
Figura 5.22: Experiência 1: resultados obtidos no dia 6 de Julho de 1998.....	144
Figura 5.23: Experiência 1: radiação solar e controlador seleccionado (6/Julho/1998)....	144
Figura 5.24: Experiência 2: resultados obtidos no dia 7 de Julho de 1998.....	145
Figura 5.25: Experiência 2: radiação solar e controlador seleccionado (7 de Julho 1998). .....	145
Figura 5.26: Experiência 3: resultados obtidos no dia 31 de Julho de 2002.....	146
Figura 5.27: Experiência 3: Radiação solar e Temperatura do óleo à entrada (31/Julho/2002).....	146

Figura 5.28: O processo laboratorial dos Três Tanques ( <i>Three-Tank System</i> ). .....	148
Figura 5.29: Representação esquemática do processo dos Três Tanques. ....	149
Figura 5.30: Diagrama do processo “Três Tanques”. .....	150
Figura 5.31: Três Tanques em malha fechada (sem FTC): entrada e saídas com falha no sensor. ....	156
Figura 5.32: Três Tanques em malha fechada (com FTC): entrada e saídas com falha no sensor. ....	157
Figura 5.33: Três Tanques em malha fechada (sem reconfiguração): entrada e saídas com falha num componente (fuga no tanque $T_1$ ). ....	158
Figura 5.34: Três Tanques em malha fechada (sem FTC): entrada e saídas com falha num componente (entupimento parcial da tubagem com a válvula $v_{13}$ ). ....	159
Figura 5.35: Três Tanques em malha fechada (com FTC): entrada e saídas com falha num componente (entupimento parcial da tubagem com a válvula $v_{13}$ ). ....	160

# Lista de Tabelas

## Capítulo 2

Tabela 2.1: Exemplos de acções de protecção automática. ....	20
Tabela 2.2: Exemplos de classes de risco para a classificação de falhas. ....	23

## Capítulo 4

Tabela 4.1: Dualidade das variáveis e dos parâmetros dos blocos de reconfiguração. ....	110
---	-----

## Capítulo 5

Tabela 5.1: Valores dos parâmetros do modelo do processo “Pêndulo Invertido”. ....	124
Tabela 5.2: Propriedades físicas do óleo. ....	134
Tabela 5.3: Base de regras do Supervisor. ....	138
Tabela 5.4: Base de regras simplificada. ....	141
Tabela 5.5: Valores dos parâmetros fundamentais do processo “Três Tanques” ....	153



# Acrónimos

ADC	<i>(Analog-Digital Converter)</i> Conversor Analógico-Digital
ARMA	<i>(Autoregressive Moving Average)</i> Auto-regressivo de média móvel
ARMAX	<i>(Autoregressive Moving Average with External Input)</i> Auto-regressivo de média móvel com entrada exógena
ARX	<i>(Autoregressive with External Input)</i> Auto-regressivo com entrada exógena
BPTT	<i>(Backpropagation Through Time)</i> Retropopagação temporal
DAC	<i>(Digital-Analog Converter)</i> Conversor Digital-Analógico
FDD	<i>(Fault Detection and Diagnosis)</i> Detecção e Diagnóstico de Falhas
FDI	<i>(Fault Detection and Isolation)</i> Detecção e Isolamento de Falhas
FDIR	<i>(Fault Detection, Isolation and Reconfiguration)</i> Detecção, Isolamento e Reconfiguração de falhas
FMEA	<i>(Failure Mode and Effects Analysis)</i> Modo de Avaria e Análise de Efeitos
FPA	<i>(Fault Propagation Analysis)</i> Análise da Propagação das Falhas
FTC	<i>(Fault Tolerant Control)</i> Controlo Tolerante a Falhas
FTCS	<i>(Fault Tolerant Control System)</i> Sistema de Controlo Tolerante a Falhas
FTSC	<i>(Fault Tolerant Supervisory Control)</i> Controlo Supervisionado Tolerante a Falhas
IMM	<i>(Interacting Multiple Model estimator)</i> Estimador de Múltiplos Modelos Interactivos
LFT	<i>(Linear Fractional Transformation)</i> Transformação Fraccional Linear
LMI	<i>(Linear Matrix Inequalities)</i> Desigualdades Matriciais Lineares
LQG	<i>(Linear Quadratic Gaussian)</i> problema Quadrático Linear Gaussiano
LQR	<i>(Linear Quadratic Regulator)</i> Regulador Quadrático Linear
LPV	<i>(Linear Parameter-Varying system)</i> sistema Linear de Parâmetros Variantes
LTI	<i>(Linear Time-Invariant)</i> sistema Linear Invariante no Tempo
MIMO	<i>(Multiple-Input Multi-Output)</i> Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas
MLP	<i>(Multilayer Perceptrons)</i> Rede neuronal proactiva multicamada
MM	<i>(Multiple Model method)</i> Método de Múltiplos Modelos
MPC	<i>(Model Predictive Control)</i> abordagem por Modelo Preditivo de Controlo

MTBF	<i>(Mean Time Between Failure)</i> Tempo Médio entre Falhas = 1/taxa de avaria
MTTR	<i>(Mean Time To Repair)</i> Tempo Médio para Reparação = 1/taxa de reparação
NARX	<i>(Nonlinear Autoregressive with External Input)</i> Auto-regressivo não-linear com entrada exógena
NP	<i>(Nominal Performance)</i> Desempenho Nominal
NS	<i>(Nominal Stability)</i> Estabilidade Nominal
PI	<i>(PI controller)</i> controlador Proporcional e Integral
PID	<i>(PID controller)</i> controlador Proporcional, Integral e Derivativo
PIM	<i>(Pseudo-Inverse Method)</i> Método da Pseudo-Inversa
PMF	<i>(Perfect Model Following)</i> método de Seguimento de Modelo Perfeito
QFT	<i>(Quantitative Feedback Theory)</i> Teoria por Realimentação Quantitativa
RM	<i>(Reconfiguration Mechanism)</i> Mecanismo de Reconfiguração
RP	<i>(Robust Performance)</i> Desempenho Robusto
RS	<i>(Robust Stability)</i> Estabilidade Robusta
SA	<i>(Structural Analysis)</i> Análise Estrutural
SISO	<i>(Single-Input Single-Output)</i> Entrada Única e Saída Única
SN	<i>(Nominal Stability)</i> Estabilidade Nominal
SVD	<i>(Singular Value Decomposition)</i> Decomposição em Valores Singulares



# 1. Introdução

A robustez e a tolerância a falhas são factores cada vez mais determinantes na supervisão e controlo de processos dinâmicos. Neste trabalho dá-se uma contribuição para a formulação estruturada de sistemas de supervisão e controlo tolerante a falhas, englobando o projecto do controlador robusto com tolerância passiva a falhas, do módulo de diagnóstico de falhas, do módulo de reconfiguração do sistema de controlo com tolerância activa a falhas e do módulo de supervisão.

Neste capítulo introdutório, faz-se o enquadramento do trabalho que resultou nesta Tese e apresentam-se os seus objectivos principais. Na secção 1.1 refere-se a motivação para o tema deste trabalho e na secção 1.2 são indicados os objectivos e as contribuições fundamentais do trabalho de investigação. Na secção 1.3 descrevem-se os aspectos mais relevantes das metodologias consideradas e da arquitectura proposta ao longo da Tese e na secção 1.4 são apresentados os processos considerados como casos de estudo. Nas secções 1.5 e 1.7 faz-se referência à organização da Tese e às publicações resultantes deste trabalho de investigação e desenvolvimento, respectivamente.

Esta Tese corresponde ao trabalho de investigação realizado pelo autor no Centro de Informática e Sistemas da Universidade de Coimbra (CISUC), sobre o desenvolvimento e aplicação de um sistema de supervisão e controlo com tolerância a falhas em sistemas dinâmicos, no âmbito das actividades de investigação do Grupo de Computação Adaptativa do CISUC.

Considerando que os sistemas de controlo modernos são cada vez mais complexos e os algoritmos de controlo cada vez mais sofisticados, as questões de disponibilidade, eficiência, fiabilidade, segurança de operação e protecção ambiental são de grande importância e devem estar presentes no projecto de sistemas de controlo.

Embora estas questões sejam de grande importância para sistemas de segurança crítica como reactores nucleares, processos químicos, veículos espaciais ou aparelhos de aviação, elas também surgem em sistemas de controlo avançado de comboios, automóveis, *pipelines*, linhas de produção e, cada vez mais, em sistemas de menor complexidade.

Actualmente, a operacionalidade dos mais diversos equipamentos depende de sistemas de controlo automático. Nas últimas quatro décadas do século XX, desenvolveram-se técnicas de controlo convencional cujos objectivos principais de projecto eram garantir a estabilidade e um desempenho adequado do sistema, assumindo que todos os componentes do sistema funcionariam normalmente. Para garantir que esses objectivos também sejam atingidos em cenários com falhas em sensores, em actuadores ou em componentes do sistema, o projecto de sistemas de controlo deve ter em consideração metodologias que permitam acrescentar a tolerância a falhas passiva ou activa aos sistemas de controlo convencionais.

As consequências de falhas nos sistemas podem ser graves em termos humanos, de impacto ambiental significativo e com graves perdas económicas. Deste modo, o desenvolvimento de sistemas de controlo tolerante a falhas tem atraído a atenção de um número cada vez maior de investigadores e de responsáveis por sistemas onde esses aspectos são de grande relevância.

Nesta Tese considera-se o projecto de sistemas de controlo tolerante a falhas (FTCS) para sistemas dinâmicos que podem representar processos onde seja desejável o aumento da confiabilidade e a melhoria do seu comportamento perante situações de falha ou avaria, embora possam não ser considerados de alto risco. O desenvolvimento de sistemas de diagnóstico e de supervisão para estes processos permite aumentar a fiabilidade e a disponibilidade de todo o sistema, garantindo, deste modo, a melhoria do seu comportamento e desempenho. Stengel (Stengel, 1991) e Patton (Patton, 1997a) apresentam o seguinte argumento para a utilização de sistemas de controlo tolerante a falhas:

«A tolerância a avarias (ou a falhas) pode ser usada para melhorar a fiabilidade, a manutenção e a sobrevivência de um sistema. Os requisitos para a tolerância a falhas são diferentes para cada um destes casos. A fiabilidade refere-se à capacidade de um sistema completar satisfatoriamente a sua tarefa e ao período de tempo, durante o qual, essa capacidade se verifica. Um sistema de controlo que possibilita a execução completa das suas tarefas, depois da existência de falhas em componentes, melhora a sua fiabilidade. A manutenção diz respeito à necessidade de reparação e à facilidade com que a reparação pode ser realizada sem penalizar o desempenho global do sistema. A tolerância a falhas pode aumentar o período de tempo entre operações de manutenção e possibilitar a utilização de procedimentos de reparação simples. A sobrevivência está relacionada com a probabilidade de conduzir a operação de um sistema de uma forma segura (sem perigo para o operador humano que controla o sistema), sempre que a tarefa seja concluída. A degradação do desempenho após a ocorrência de uma falha é permitida desde que o sistema seja conduzido para um estado de funcionamento aceitável.»

Um sistema de controlo tolerante a falhas é, essencialmente, um sistema de controlo em malha fechada com capacidade para tolerar falhas e, eventualmente, avarias em sensores, actuadores e componentes do sistema, para além de manter a estabilidade e um certo grau de desempenho do sistema, na presença dessas falhas. O sistema engloba, para além do sistema de controlo propriamente dito, o módulo de diagnóstico que, baseado no modelo do sistema dinâmico, é responsável pela detecção, isolamento e identificação das falhas, permitindo a determinação das suas características e, assim, gerar a informação necessária para que o sistema de supervisão realize a gestão de todo o sistema. O sistema de supervisão é responsável pela identificação do modo de funcionamento do sistema, pela geração de informação relevante para o operador, através de uma interface humano-máquina, e pela tomada de decisões, realizando acções correctivas em resposta às situações com falhas ou avarias, procurando aumentar a fiabilidade, a manutenção e a sobrevivência do sistema.

O trabalho apresentado nesta Tese tem dois objectivos principais:

i) O desenvolvimento de um sistema de controlo robusto que combine a tolerância passiva a falhas e o diagnóstico de falhas em sistemas dinâmicos, usando metodologias baseadas em modelos, nomeadamente as metodologias de análise e de síntese da teoria do controlo robusto;

ii) O desenvolvimento de um sistema de supervisão e controlo com tolerância activa a falhas com capacidade de geração de acções correctivas para acomodação das falhas, envolvendo, em casos de falhas com um grau de severidade elevado, a reconfiguração do sistema de controlo. A metodologia de reconfiguração do sistema deve privilegiar a manutenção do controlador activo e explorar a redundância física e analítica do processo.

## 1.1 Motivação

As exigências actuais ao nível do desempenho dos sistemas de controlo para sistemas dinâmicos, nomeadamente em processos industriais, combinadas com o aumento da complexidade dos equipamentos envolvidos em todo o processo de controlo, impõem um nível elevado de automação, onde a maioria das tarefas são realizadas por computadores e onde a monitorização dos sistemas tem um papel fundamental na obtenção de informação de diagnóstico e assim possibilitar a supervisão e controlo dos sistemas de uma forma robusta e confiável. Anteriormente, os requisitos para um sistema de controlo correspondiam essencialmente ao aumento da quantidade e da qualidade dos produtos resultantes de um dado processo. Daqui resultou o desenvolvimento de diferentes tipos de controladores, como os, largamente utilizados, controladores auto-sintonizáveis (de que os controladores do tipo PID são um exemplo), os baseados em modelos (controladores óptimos, robustos ou adaptativos) ou os baseados em técnicas avançadas (também referenciadas como inteligentes) como as redes neuronais e a lógica difusa, entre outras.

Com a generalização da automatização dos processos dinâmicos e com o progressivo aumento da sua monitorização, verifica-se, habitualmente, a utilização de instrumentação (sensores e actuadores) redundante. Apesar dos possíveis benefícios daí resultantes, os sistemas passam a apresentar uma maior vulnerabilidade à ocorrência de falhas na instrumentação, podendo afectar decisivamente a disponibilidade do sistema.

Considerando, por um lado, as crescentes exigências de segurança e os requisitos para a obtenção de produtos de alta qualidade e, por outro, o aumento da complexidade dos processos, torna-se evidente a necessidade de expandir as funcionalidades dos sistemas de controlo convencionais. Em particular, os sistemas de controlo deverão possibilitar a detecção e o isolamento de falhas (FDI), permitindo a sua posterior estimação e acomodação pelo sistema de supervisão.

Tendo em conta que estas tarefas são, em muitos casos, realizadas por supervisores humanos, será desejável que os sistemas de controlo apresentem um nível elevado de autonomia, libertando os supervisores humanos dessas tarefas. A autonomização do sistema de controlo também permitirá uma maior protecção dos supervisores humanos e do ambiente circundante, para além de uma maior rapidez e eficácia na resposta às falhas do sistema.

Percorrendo o nosso passado recente, encontramos inúmeros exemplos em diferentes áreas de aplicação, em que uma falha, muitas vezes simples, teve consequências drásticas quer em termos económicos, quer em termos humanos. Referem-se, em seguida, alguns desses casos:

i) Na aviação: um avião DC10 da American Airlines despenhou-se em 1979 no Aeroporto Internacional de Chicago-O'hare, devido a um problema num elevador. O piloto não recebeu qualquer indicação de existência de falha. Entretanto, um estudo sobre o acidente mostrou que o acidente poderia ter sido evitado se a falha tivesse sido detectada e prontamente indicada ao piloto. Neste caso, para além da perda do avião, as consequências traduziram-se na perda de várias vidas humanas.

ii) Nas viagens aeroespaciais: O foguetão Ariane 5 explodiu em Junho de 1996, 37 segundos após ter sido lançado, devido a uma excepção no software, a qual originou a transmissão ao controlador de dados errados sobre a posição e a trajectória do foguetão (Lions, 1996). Este acidente pôs termo a um programa com um grande investimento financeiro.

iii) Na navegação: Em dois acidentes semelhantes, na Dinamarca e na Noruega, um barco embateu contra o cais devido a falhas num sensor. Devido à indicação errada fornecida pelo sensor, o operador do barco acelerou em vez de desacelerar, provocando a colisão contra o cais.

Nestes e em muitos outros exemplos que poderiam ser referidos, as consequências das falhas poderiam ter sido evitadas ou pelo menos atenuadas. A utilização de sistemas de controlo com tolerância a falhas poderá traduzir-se por uma maior disponibilidade dos sistemas perante a existência de falhas na instrumentação e nos componentes do sistema.

Para obter sistemas de controlo tolerantes a falhas as estratégias a seguir devem basear-se no conhecimento da estrutura do processo, na fiabilidade dos seus vários componentes, na existência de componentes redundantes, nas possibilidades de reconfiguração e nos diferentes tipos de funções disponíveis no sistema de controlo.

## 1.2 Objectivos e Contribuições

Os objectivos deste trabalho de investigação podem ser enquadrados em duas linhas de orientação principais. A primeira insere-se numa perspectiva de evolução da actividade e das competências do grupo de investigação, tendo em conta as tendências actuais do desenvolvimento dos sistemas de controlo e o posicionamento do grupo no Centro de Informática e Sistemas em ligação com o Departamento de Engenharia Informática. Deste modo, este trabalho insere-se no desenvolvimento da área de Diagnóstico e de Supervisão em Sistemas de Controlo, promovendo a continuidade do trabalho já existente no projecto de sistemas de controlo robusto e o desenvolvimento de sistemas de supervisão, abrangendo o diagnóstico de falhas e a reconfiguração do sistema.

O outro objectivo corresponde ao desenvolvimento de metodologias de projecto de sistemas de controlo tolerantes a falhas, passivos e activos, com características robustas e com a capacidade de gestão da informação gerada pela detecção e isolamento das falhas.

Assim, numa primeira fase, foi considerada a extensão da formulação tradicional de um problema de controlo robusto para o projecto de controladores com tolerância passiva a falhas. Complementarmente, o projecto do sistema de diagnóstico de falhas é integrado no projecto do controlador, considerando uma abordagem baseada no modelo do processo e na formulação de controlo robusto.

A segunda fase corresponde ao projecto de um sistema activo com um supervisor que promova a acomodação das falhas através da geração de acções correctivas adequadas, que identifique em cada momento o modo de funcionamento do processo, e que efectue, sempre que necessário, a reconfiguração do sistema.

Tendo em conta que o projecto de um sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas baseado no modelo do processo é fortemente dependente das características dinâmicas do sistema a controlar, incluiu-se neste trabalho a aplicação das metodologias propostas a processos com características dinâmicas distintas e que possam representar vários processos existentes, por exemplo, no meio industrial. Para atingir este objectivo, foram considerados os processos laboratoriais existentes no Laboratório do Grupo de Computação Adaptativa do CISUC (os processos laboratoriais “Pêndulo Invertido” e “Três Tanques”) e um Campo de Colectores Solares existente na Plataforma Solar de Almería, em Espanha.

Considerando estes objectivos e o trabalho desenvolvido, indicam-se, em seguida, as principais contribuições desta Tese:

- i) Na sequência do enquadramento na área de controlo tolerante a falhas, efectuado no capítulo 2, a abordagem e metodologias apresentadas no capítulo 3 descrevem a contribuição para a introdução da capacidade de tolerância passiva a falhas em sistemas de controlo robusto projectados em simultâneo com o módulo de diagnóstico de falhas. Neste capítulo é proposta uma extensão da formulação do problema de controlo robusto a alguns tipos de falhas. Para que seja possível fazer o diagnóstico de falhas introduz-se um módulo para a sua detecção, isolamento e identificação. A metodologia proposta para o projecto desse módulo considera a especificação conjunta dos objectivos de controlo e de diagnóstico de falhas, usando a formulação de controlo robusto. Esta abordagem constitui uma contribuição para a obtenção de um sistema de controlo robusto com características de tolerância passiva a falhas e que, simultaneamente, possibilite a geração de resíduos representativos das falhas a diagnosticar.
- ii) Tendo por base o objectivo de obter um sistema com tolerância activa a falhas, é proposta no capítulo 4 uma metodologia para o projecto de um sistema de supervisão que permita a acomodação de falhas e a reconfiguração do sistema de controlo em função do tipo e severidade das falhas. Com a integração de um sistema de supervisão num sistema de controlo de processos pretende-se, a partir do diagnóstico das falhas, caracterizar o modo de funcionamento do processo, fornecer informação ao operador, gerar as acções correctivas necessárias à acomodação de falhas e determinar, caso seja necessário, as acções conducentes à reconfiguração do sistema de controlo. A abordagem proposta constitui uma contribuição para a especificação da arquitectura e para o projecto do sistema de supervisão, nomeadamente no que se refere ao estabelecimento de um mecanismo de definição do modo de funcionamento do sistema, e à utilização de um módulo de decisão para a geração de informação sobre a ocorrência de falhas e para a reconfiguração do sistema de controlo.
- iii) A contribuição para o estabelecimento de um mecanismo de reconfiguração do sistema de controlo baseia-se, essencialmente, na utilização de sensores e actuadores virtuais para que, sempre que seja possível, não ocorra a alteração do controlador em uso. No caso de falha em sensores é proposta a estimação da variável com falha, usando toda a informação disponível por redundância física ou analítica. Perante a inoperabilidade de componentes do sistema, o sistema deve ser reconfigurado, tirando partido da redundância existente no processo e/ou na instrumentação associada. Sempre que a operação de reconfiguração implique a reconfiguração do próprio controlador é proposta a selecção de controladores pré-sintonizados para os vários modos de funcionamento previstos. O projecto de cada controlador baseia-se nas metodologias de controlo robusto usadas no projecto de controladores com tolerância passiva a falhas.

- iv) O projecto e a implementação de sistemas de supervisão e controlo com tolerância passiva e activa a falhas nos processos dinâmicos referidos no capítulo 5, vem mostrar a aplicabilidade das contribuições propostas em sistemas reais e potenciar a sua extensão a outros processos dinâmicos de maior dimensão e complexidade.

Espera-se que a investigação que deu origem a esta Tese, conjuntamente com o trabalho de outros investigadores, contribua para o desenvolvimento desta área de investigação na comunidade portuguesa de Controlo Automático e a sua inserção na investigação internacional.

### **1.3 O Sistema de Controlo Tolerante a Falhas Proposto**

Como foi referido na secção anterior, pretendeu-se, com este trabalho, desenvolver metodologias para o projecto de sistemas de controlo tolerantes a falhas, passivos e activos, sendo estes constituídos, para além do sistema de controlo propriamente dito, por um módulo de detecção e de diagnóstico das falhas e pelo módulo de supervisão.

A abordagem, utilizada no diagnóstico das falhas, baseia-se no modelo do sistema dinâmico e na formulação do controlo robusto. Pretende-se, desta forma, fazer a integração do projecto do controlador e do módulo de diagnóstico de falhas usando as ferramentas de análise e de síntese de controlo robusto. A formulação dos objectivos de controlo e de diagnóstico é feita no domínio da frequência, obtendo-se um sistema de controlo com características robustas em relação a incertezas no modelo e a alguns tipos de falhas. Os resíduos gerados pelo módulo de diagnóstico de falhas apresentam robustez relativamente às incertezas consideradas e são usados pelo supervisor para gerar acções adequadas à acomodação e/ou à reconfiguração do sistema.

O supervisor é constituído por um mecanismo lógico de decisão que se baseia na informação que resulta do diagnóstico de falhas e pela identificação do modo de funcionamento do sistema. Em caso de falha, o supervisor gera acções correctivas para acomodação da falha, baseadas, essencialmente, em sensores e actuadores virtuais e/ou na comutação entre controladores previamente projectados para o modo de funcionamento associado à falha diagnosticada. Quando não é possível acomodar a falha desta forma, o sistema de supervisão deve gerar outras acções correctivas necessárias à reconfiguração do sistema de forma a atenuar os efeitos da falha (ou mesmo avaria) garantindo a segurança do processo, do operador e do meio envolvente, embora se possa verificar alguma degradação dos objectivos de desempenho inicialmente definidos.

Dado que o projecto de todo o sistema de supervisão apresenta características que dependem da aplicação, fez-se o desenvolvimento e a implementação de sistemas de supervisão e controlo tolerantes a falhas para alguns casos de estudo, cujas características fundamentais são indicadas na secção seguinte.

## 1.4 Os Casos de Estudo

O projecto de um sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas depende, essencialmente, das características dinâmicas do processo, da disponibilidade de sensores e de actuadores e das possibilidades de reconfiguração do processo.

Os processos considerados como casos de estudo para a aplicação da arquitectura proposta para o sistema de supervisão, controlo e diagnóstico de falhas, embora não apresentem uma significativa redundância de equipamento (hardware), têm características dinâmicas diversas (constantes de tempo, estabilidade ...), podendo, deste modo, representar um leque alargado de aplicações mais complexas. Concretizando em relação aos processos laboratoriais, o Processo “Três Tanques” apresenta uma dinâmica estável em malha aberta e permite a introdução de falhas como, por exemplo, a obstrução à passagem de líquido em tubos ou fugas em tanques, que poderão ser representativas de falhas equivalentes em sistemas de armazenamento e transporte de líquidos, muito frequentes em processos industriais e em sistemas usados em medicina. Dado que este processo possui elementos físicos redundantes (tanque e bomba) o aspecto da reconfiguração foi, essencialmente, testado neste processo.

Relativamente ao processo “Pêndulo Invertido”, este apresenta um comportamento dinâmico instável em malha aberta que poderá corresponder ao comportamento de sistemas críticos como o caso de helicópteros, aviões ou foguetões.

No caso do Campo de Colectores Solares da Plataforma Solar de Almería, dadas as suas características próprias de um sistema de dimensão industrial, com um comportamento dinâmico variante no tempo (dependente da energia solar), procurou-se aplicar algumas das abordagens propostas neste trabalho, apesar das limitações em termos de duração da utilização da instalação real e das próprias condições meteorológicas. De referir que, neste caso, algumas situações climatéricas, como a passagem de nuvens sobre a instalação, foram consideradas como perturbações no processo, podendo assim avaliar a capacidade de resposta do sistema de supervisão e controlo a essas situações.

Os resultados obtidos permitem perspectivar a aplicabilidade da arquitectura e das metodologias propostas a outros processos de maior dimensão.



## 1.5 Organização da Tese

Esta Tese é composta por seis capítulos, incluindo este capítulo de Introdução, e está organizada da seguinte forma:

### Capítulo 2 – Supervisão e Controlo Tolerante a Falhas

Neste capítulo faz-se um levantamento do estado de arte na supervisão, no controlo tolerante a falhas e no diagnóstico de falhas em sistemas dinâmicos. Procede-se ao enquadramento da abordagem e das metodologias propostas na Tese nos trabalhos já existentes.

### Capítulo 3 – Diagnóstico e Tolerância Passiva a Falhas

Neste capítulo descreve-se a abordagem proposta para a tolerância passiva a falhas, propondo uma extensão das técnicas de controlo robusto para o projecto simultâneo do controlador e do módulo de diagnóstico de falhas. A formulação do problema é feita no domínio da frequência em  $H_\infty$ , obtendo-se um controlador com características robustas em relação a incertezas no modelo e a alguns tipos de falhas. Dado que a metodologia proposta se baseia no modelo do processo propõe-se, para a sua identificação, a utilização de redes neuronais com uma topologia recorrente de Elman. O módulo de diagnóstico de falhas é responsável pela geração de resíduos que as identifiquem.

### Capítulo 4 – Controlo com Tolerância Activa a Falhas

No início deste capítulo propõe-se uma arquitectura estruturada para o sistema de supervisão e controlo com tolerância activa a falhas. Tendo por base a informação de diagnóstico de falhas, é considerada uma metodologia de reconfiguração do sistema que considera sensores e actuadores virtuais, procurando assegurar tolerância activa a falhas sem que o controlador nominal tenha de ser alterado. O sistema de controlo é constituído por um conjunto de controladores previamente sintonizados para cada modo de funcionamento (com e sem falhas). Para a sintonização dos controladores considera-se, essencialmente a análise e a síntese de controlo robusto. Para o supervisor, propõe-se uma formulação baseada em lógica difusa que permita identificar o modo de funcionamento e, desse modo, seleccionar o controlador correspondente. Outra tarefa do supervisor consiste em gerar as acções correctivas que assegurem o funcionamento do processo em segurança e com o mínimo de degradação do seu desempenho. Aqui inclui-se, ainda, a tarefa de validação da referência, definida pelo supervisor humano.

## Capítulo 5 – Casos de Estudo

Para a análise de robustez das metodologias propostas para o projecto do sistema de controlo tolerante a falhas, passivo e activo, considera-se, neste capítulo, a sua aplicação a três casos de estudo: i) o processo “Pêndulo Invertido” que é caracterizado pela instabilidade em malha aberta; ii) o Campo de Colectores Solares existente na Plataforma Solar de Almería, em Espanha, que apresenta dimensões industriais e alguma complexidade, inserindo-se numa área de aproveitamento dos recursos naturais que importa desenvolver; iii) o processo “Três Tanques” que apresenta componentes redundantes, possibilitando a implementação das metodologias de acomodação de falhas e de reconfiguração do processo. Este sistema é representativo de processos em várias áreas onde se verifique, nomeadamente, o armazenamento e transporte de líquidos.

## Capítulo 6 – Conclusão

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões deste trabalho e sugerem-se algumas propostas para a sua continuidade, em particular, numa perspectiva de enquadramento e de consolidação na área de Engenharia Informática.

Cada capítulo da Tese contém uma breve introdução inicial, salientando os seus objectivos, e um sumário dos assuntos a desenvolver em cada secção. No final, é feita uma síntese dos principais aspectos desenvolvidos no capítulo e formuladas algumas conclusões. No final da Tese inclui-se o Apêndice A com uma proposta para a versão portuguesa da terminologia usada, frequentemente, na área de controlo tolerante a falhas e o Apêndice B com informação sobre definições e princípios básicos para a formulação do problema de controlo robusto.

## 1.6 Convenções e Meios

Tendo em conta que a área de tolerância a falhas em sistemas de supervisão e controlo ainda não apresenta uma grande expressão na comunidade portuguesa de controlo automático, procurou-se, sempre que possível, traduzir para português os termos utilizados pela comunidade científica internacional desta área. Como esta tradução da terminologia inglesa não está ainda normalizada, apresenta-se no Apêndice A uma lista de termos com a indicação da sua correspondência em inglês. Relativamente às abreviaturas, usou-se preferencialmente a notação inglesa, dado ser o formato mais facilmente reconhecido.

Relativamente ao suporte informático, o texto desta Tese foi escrito no processador de texto Microsoft Word (© Microsoft Corporation) e as figuras e os gráficos foram tratados no Microsoft Visio (© Microsoft Corporation). Para a simulação dos vários sistemas foram utilizados os programas Matlab e Simulink (© MathWorks, Inc.).

Para a implementação do sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas nos casos de estudo, foi utilizado o seguinte software:

- i) Processo “Pêndulo Invertido”: Compilador Borland C++ (© Borland International, Inc.);
- ii) Campo de Colectores Solares de Almería: Turbo C++ (© Borland International, Inc.) e Extended Real Time Toolbox (© Humusoft) com o Matlab e Simulink;
- iii) Processo “Três Tanques”: Extended Real Time Toolbox (© Humusoft) com o Matlab e Simulink.

## 1.7 Publicações

Do trabalho de investigação apresentado nesta Tese resultaram, fundamentalmente, as seguintes publicações:

“*Supervision and Fault-Tolerant Control: a Robust Model-based Approach*”, A. Cardoso e A. Dourado. Aceite para apresentação na IEEE International Conference on Control Applications – Joint CCA/ISIC/CACSD 2006, Munich, Alemanha, 4-6 de Outubro, 2006.

“*Application of a Fault-Tolerant Control strategy to a nonlinear plant using a robust fault diagnosis approach*”, A. Cardoso e A. Dourado. Aceite para apresentação na 7<sup>th</sup> Portuguese Conference on Automatic Control – CONTROLO 2006, IST, Lisboa, Portugal, 11-13 de Setembro, 2006.

“*Supervision and Robust Fault-Tolerant Control of a Nonlinear Reconfigurable Process*”, A. Cardoso e A. Dourado. Aceite para apresentação na 12<sup>th</sup> IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics - MMAR 2006, 28-31 de Agosto, 2006, Międzyzdroje, Poland.

“*Experiments with a Fault Tolerant Adaptive Controller on a Solar Power Plant*”, A. Cardoso, P. Gil, J. Henriques, P. Carvalho, H. Duarte-Ramos e A. Dourado. Proc. of the 6<sup>th</sup> Portuguese Conference on Automatic Control – Controlo 2004, Faro, Portugal, 2004.

“*A Robust Fault Tolerant Control Framework: Application to a Solar Power Plant*”, A. Cardoso, P. Gil, J. Henriques, P. Carvalho, H. Duarte-Ramos e A. Dourado. Proc. of the IASTED Int. Conference on Intelligent Systems and Control, Salzburg, Austria, 2003.

“*Experiments with an Adaptive Model-Based Predictive Controller Applied to a Distributed Solar Collector Field: Performance and Fault Tolerance Assessment*”, P. Gil, A. Cardoso, J. Henriques, P. Carvalho, H. Duarte-Ramos e A. Dourado. Proc. of the 3<sup>rd</sup> IHP Workshop at Plataforma Solar de Almería, Espanha, 2003.

“*Neural Networks in Scheduling Linear Controllers with Application to a Solar Power Plant*”, P. Gil, A. Dourado, J. Henriques e A. Cardoso. Proc. of the IASTED Control and Applications, Cancun, México, 2002.

“*Scheduling of PID controllers by means of a Neural Network With Application to a Solar Power Plant*”, J. Henriques, A. Dourado, P. Gil e A. Cardoso. Proc. of the International Joint Conference on Neural Networks – IJCNN 2002, Honolulu, USA, 2002.

“*Synthesis of a Robust Controller and Fault Detection Filter for an Unstable System*”, A. Cardoso e A. Dourado. Proc. of the 3<sup>rd</sup> IFAC Symposium on Robust Control Design - ROCOND 2000, Prague, República Checa, 2000.

“*Supervision and C-Means Clustering of PID Controllers for a Solar Power Plant*”, J. Henriques, A. Cardoso e A. Dourado. Journal of Approximate Reasoning, Vol. 22, Issue 1-2, 73-91, 1999.

“*Intelligent Control and Supervision at Centro de Informática e Sistemas da Universidade de Coimbra*”, A. Dourado, A. Cardoso, P. Gil, J. Henriques, R. Paiva, C. Pereira, A. Santos e J. Victor, Actas das XX Jornadas de Automática, Salamanca, Espanha, 1999.

“*Fuzzy Supervisor and Feedforward Control of a Solar Power Plant using Accessible Disturbances*”, A. Cardoso, J. Henriques e A. Dourado. Proc. of the European Control Conference - ECC99 (CDROM), Karlsruhe, Alemanha, 1999.

“*Robust Model-Based Fault Tolerant Control of a Mobile Structure -Application to an Inverted Pendulum*”, A. Cardoso e A. Dourado. Proc. of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Intelligent Robotic Systems, Coimbra, Portugal, 1999.

“*Fuzzy Supervisor of PID Controllers for the Acurex Field at PSA*”, J. Henriques, A. Cardoso e A. Dourado, Proc. of the 2<sup>nd</sup> Annual Workshop, Plataforma Solar de Almería, Espanha, 1998.

## **2. Supervisão e Controlo Tolerante a Falhas**

Cada vez mais, o controlo de processos dinâmicos exige a consideração de um sistema de supervisão que promova autonomia e fiabilidade de todo o sistema. Na secção 2.1 deste capítulo introduzem-se os aspectos fundamentais dum sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas. A referência à importância da tolerância a falhas nos sistemas de controlo actuais é feita na secção 2.2. Na secção 2.3 apresentam-se as características fundamentais do sistema de supervisão e faz-se referência à terminologia usada neste trabalho. Nas secções 2.4 e 2.5 apresenta-se a classificação e a modelização das falhas consideradas. Os principais componentes de um sistema de controlo tolerante a falhas (FTCS) são descritos na secção 2.6. Na secção 2.7 faz-se um levantamento do estado de arte na área de controlo tolerante a falhas (denominação abrangente das questões tratadas nesta Tese), considerando os métodos passivos e activos. O enquadramento da abordagem proposta para o FTCS nos trabalhos existentes é referido na secção 2.8. A terminar, apresentam-se as conclusões fundamentais na secção 2.9.

### **2.1 Introdução**

A área de controlo tolerante a falhas (FTC) constitui um desafio à investigação realizada ao longo dos anos sobre a teoria do controlo, no sentido do desenvolvimento de arquitecturas e de metodologias que assegurem, com um elevado grau de segurança, o desempenho e a robustez dos sistemas.

A possibilidade de detectar e diagnosticar as falhas que ocorram num sistema e a acomodação dessas mesmas falhas, recorrendo eventualmente à reconfiguração do sistema de controlo, são factores cada vez mais determinantes para o sucesso dum sistema de supervisão e controlo e para a transferência dos resultados da investigação para os processos industriais.

A supervisão de processos dinâmicos tem como principais objectivos monitorizar o estado do processo em cada momento, identificando os estados indesejados ou não permitidos, e agir apropriadamente para evitar avarias ou mesmo acidentes. Os desvios relativamente ao comportamento normal do processo ou dos seus componentes resultam normalmente de falhas e de erros com causas diversificadas. Caso não sejam realizadas acções apropriadas, esses desvios do funcionamento normal podem resultar num funcionamento defeituoso ou mesmo em avaria por um período de tempo que poderá ser de curta ou de longa duração.

Deste modo, uma das principais motivações para a consideração de um sistema de supervisão é a necessidade de evitar o funcionamento defeituoso ou a avaria de um processo ou de algum dos seus componentes.

## 2.2 A Importância da Tolerância a Falhas

A sociedade actual depende fortemente da disponibilidade e do funcionamento correcto de processos tecnológicos, muitos deles de grande complexidade. Por isso, os sistemas de controlo de processos estão presentes nos mais diversos domínios da vida. Muitos interagem connosco de uma forma mais ou menos visível, não sendo já do domínio exclusivo dos ambientes industriais ou das naves espaciais. Estão presentes em diversos aparelhos nas nossas cozinhas, nos leitores de DVD (*Digital Video Disc*), nos computadores, nos elevadores de um edifício ou no automóvel. Estão, de uma forma emergente, em ambientes hospitalares, procurando aumentar a capacidade de monitorização (*monitoring*) e controlo dos vários processos vitais no ser humano, por exemplo, controlando a anestesia aquando de intervenções cirúrgicas. Naturalmente, encontram-se em barcos, comboios, aviões, naves espaciais ou em qualquer indústria, efectuando o controlo, por exemplo, de reactores químicos, de colunas de destilação ou dos processos de uma central de energia nuclear.

Os sistemas de controlo procuram garantir que o processo que controlam funciona correctamente, sempre que os seus serviços são solicitados e de acordo com os objectivos definidos (pelo fabricante ou pelo utilizador). No entanto, um processo e o próprio sistema de controlo estão sujeitos a falhas (*faults*), causando, muitas vezes, reacções indesejáveis, avarias (*failures*) ou mesmo conduzir à paragem do processo, podendo, conseqüentemente, provocar estragos em componentes do processo, nos seus utilizadores ou no ambiente circundante.

As falhas no contexto dos sistemas tecnológicos podem considerar-se eventos que, usualmente, acontecem com pouca frequência e em instantes de tempo inesperados. Em Isermann e Ballé (1997) é proposta a seguinte definição de falha:

**Definição 2.1 (Falha):** Falha é um desvio não permitido ao comportamento aceitável, usual ou normal (standard), de, pelo menos, uma propriedade característica ou parâmetro de um sistema.

As falhas são normalmente difíceis de prever e de prevenir. Se não se considerarem sistemas de supervisão (*supervision*) e de diagnóstico de falhas (*fault diagnosis*) pode acontecer que a falha progrida para uma avaria do processo, originando situações cuja gravidade e prejuízo se pode traduzir em algumas dezenas de euros para um simples leitor de DVD ou em enormes perdas humanas, ambientais e económicas se estivermos a falar de incidentes graves em sistemas de segurança crítica (*safety-critical systems*). Infelizmente, existem vários exemplos de incidentes graves como os que a seguir se indicam:

- i) a queda do avião da American Airlines, voo 191, um aparelho McDonnell-Douglas DC-10, no *Chicago O'Hare International Airport* em 25 de Maio de 1979. Neste acidente perderam a vida 271 passageiros e 2 pessoas em terra (NTSB, 1979; Patton, 1997a);
- ii) a explosão na central nuclear de Chernobyl, na Ucrânia, em 26 de Abril de 1986 (Mahmoud *et al.*, 2003). Cerca de 30 pessoas morreram imediatamente, enquanto outras 15000 morreram e 50000 ficaram incapacitadas durante a intervenção de limpeza após o acidente. Estima-se que 5 milhões de pessoas estiveram, de alguma forma, expostas à radiação na Ucrânia, na Bielo-Rússia e na Rússia (BBC World, 2001);
- iii) a queda do avião *Boeing 747-200F* ocorrida em 4 de Outubro de 1992. Pouco depois de ter levantado voo do *Schiphol Amsterdam International Airport*, verificou-se a separação de vários elementos da asa direita, provocando danos graves no aparelho. Cerca de quinze minutos depois, o avião despenhou-se contra um edifício de onze andares (Maciejowski and Jones, 2003);
- iv) a explosão do foguetão Ariane 5 em 4 de Junho de 1996, devido a uma falha na Unidade de Referência Internacional que tinha a tarefa de fornecer ao sistema de controlo a informação sobre a altitude e a trajectória a seguir. O acidente resultou da informação incorrecta sobre a altitude fornecida à unidade de controlo (Mahmoud *et al.*, 2003).

A questão que surge imediatamente é se teria sido possível fazer alguma coisa para evitar estes acidentes. Embora em muitas situações não seja possível prevenir a ocorrência de falhas nos processos, as análises efectuadas posteriormente acabaram por revelar que as consequências das falhas podiam ter sido evitadas ou, pelo menos, a sua gravidade (em termos de perda de vidas e/ou económicas) podia ter sido minimizada.

Se as falhas puderem ser detectadas e diagnosticadas atempadamente, será possível em muitas situações efectuar a sua acomodação ou, em casos mais críticos, proceder à reconfiguração (*reconfiguration*) do processo e do sistema de controlo, de forma a garantir que todo o sistema continua a sua operação em segurança (mesmo admitindo que o seu desempenho se degrade ou os objectivos sejam relaxados) até que se possa efectuar a operação de manutenção (reparação ou substituição) do(s) componente(s) que estiveram na origem da falha. Daqui se conclui facilmente que, pelo menos, os sistemas de segurança crítica devem satisfazer os requisitos das propriedades de segurança (*safety*) e de fiabilidade (*reliability*), de forma a minimizar os riscos de ocorrência de avarias que conduzam a acidentes graves.

Os sistemas de controlo que procuram de alguma forma dar resposta às falhas dizem-se, genericamente, sistemas de controlo tolerante a falhas – FTCS (*fault-tolerant control systems*). No caso dos sistemas de controlo serem supervisionados, estes designam-se por sistemas de controlo supervisionado tolerante a falhas - FTSC (*Fault-Tolerant Supervisory Control*). Os estudos realizados após a queda do DC-10 da MacDonell-Douglas mostraram que o acidente podia ter sido evitado (Patton, 1997a). Um FTCS poderia ter sido projectado para efectuar a desactivação em segurança do reactor da central de Chernobyl, antes deste explodir (Mahmoud *et al.*, 2003). No caso do Boeing 747, estudos de simulação (Maciejowski and Jones, 2003) vieram a revelar que teria sido possível reconfigurar o sistema de controlo para que o avião pudesse aterrar de emergência, mas em segurança. Finalmente, nos minutos que antecederam a explosão do Ariane 5, a informação sobre a altitude normal foi substituída por informação de diagnóstico que o sistema de controlo não soube interpretar por deficiência de projecto (Mahmoud *et al.*, 2003).

A comprovar que estas conclusões não são só teorias e resultados de simulação, há relatos de situações práticas como as que a seguir se indicam:

- i) o aparelho DC-10 da *McDonell-Douglas* que efectuava um voo 232 da United Airlines, de Denver para Minneapolis, teve uma avaria grave no circuito hidráulico que deixou o avião sem qualquer controlo de superfície a 37000 pés. Perante tal situação, os pilotos do avião improvisaram uma estratégia de controlo que usava unicamente os controladores das duas asas, tendo conseguido efectuar uma aterragem (quase) bem sucedida, embora violenta, e salvo a vida a 184 dos 296 passageiros (Jones, 2002; Maciejowski and Jones, 2003);
- ii) num voo 1080 da Delta Airlines, um elevador ficou preso na posição de 19° (para cima). Embora o piloto não tenha obtido nenhuma informação do que realmente estava a suceder, conseguiu reconfigurar os restantes elementos de controlo lateral e efectuar a aterragem em segurança (Patton, 1997a).

Com as exigências económicas para uma elevada disponibilidade (*availability*) dos processos e a crescente consciencialização sobre os riscos associados ao seu funcionamento defeituoso (*malfunction*), a confiabilidade (*dependability*) dos sistemas passou a ter grande relevância no meio industrial e, de uma forma geral, nos processos automatizados (dos mais simples aos mais complexos).



Todos estes exemplos promovem uma forte motivação para contribuir para o aumento da tolerância a falhas (*fault-tolerance*) no projecto de sistemas de controlo que permitam maximizar a segurança, a fiabilidade, a disponibilidade e a eficiência dos processos, em particular, dos processos de segurança crítica cuja complexidade tem crescido fortemente. Daí que, desde o início da década de 1970, a investigação no diagnóstico de falhas em processos tenha vindo a crescer consideravelmente em todo o mundo, tanto nos aspectos teóricos como nas aplicações (Frank and Ding, 1997; Patton and Chen, 1997).

Deste modo, a investigação na detecção e diagnóstico de falhas e no controlo de processos tolerante a falhas tem vindo a ter uma crescente relevância na comunidade científica internacional, promovendo a interacção entre grupos oriundos de diversas áreas como do controlo, da matemática, do processamento de sinal, da computação adaptativa ou da inteligência artificial. Poder-se-á dizer que a tolerância a falhas é um domínio que resulta da combinação de várias disciplinas, tendo como objectivo central evitar que as falhas que possam ocorrer em componentes de um processo se desenvolvam e se transformem em avarias que conduzam ao mau funcionamento do processo e a possíveis situações de insegurança.

Em determinadas aplicações de segurança crítica, onde as avarias não podem ser toleradas, utiliza-se a redundância de hardware (*hardware redundancy*) para facilitar a recuperação (*recovery*) do sistema perante a ocorrência de uma falha. Os sistemas podem ser classificados tendo em conta a capacidade e a forma como reagem às falhas. Os sistemas que reagem à avaria com operacionalidade (*fail-operational*) são projectados e construídos de forma a garantir insensibilidade a qualquer avaria localizada num componente do sistema. Os sistemas que respondem à avaria com segurança (*fail-safe*) efectuem a transição do sistema com avaria (resultante de uma falha crítica) para um estado que se pode considerar em segurança, num determinado contexto. Os sistemas tolerantes a falhas (*fault-tolerant*) procuram tirar partido da redundância no processo e do sistema automatizado de controlo para, através de software inteligente, efectuar a monitorização do comportamento dos vários componentes do processo e de blocos funcionais de todo o sistema. Estes sistemas deverão ser capazes de detectar as falhas (*fault detection*), de efectuar o seu diagnóstico (*fault diagnosis*) através do isolamento da falha (*fault isolation*) e da correspondente identificação (*fault identification*), e gerar as acções de reparação (*repair actions*) necessárias a impedir que a falha se transforme numa avaria crítica para todo o sistema. Em termos gerais, a estratégia de controlo tolerante a falhas consiste em garantir a disponibilidade do processo, aceitando a degradação do seu desempenho quando ocorrer uma falha crítica.

O trabalho apresentado nesta dissertação pretende contribuir para o desenvolvimento e aplicação de metodologias de projecto estruturado de sistemas de supervisão e de controlo tolerante a falhas onde a componente de robustez tem um papel relevante.

Nas secções seguintes apresenta-se uma síntese das tarefas básicas de um sistema de supervisão e faz-se referência à terminologia que é habitualmente considerada nesta área.

## 2.3 O Sistema de Supervisão

Num processo dinâmico em malha aberta (Figura 2.1) com entradas controláveis  $u(t)$ , entradas não controláveis e perturbações  $p(t)$ , ruído  $n(t)$ , variáveis de estado  $x(t)$  e saídas mensuráveis  $y(t)$ , as falhas  $f(t)$  podem ser devidas a causas internas,  $f^{int}(t)$ , ou externas,  $f^{ext}(t)$ , representando  $t$  a variável temporal.

Exemplos de causas internas são a fricção ou o desgaste elevado devido a uma lubrificação defeituosa de elementos mecânicos, o sobreaquecimento, as fugas, as obstruções ou os curto-circuitos. Como causas externas podem dar-se como exemplos, a influência das condições ambientais, como a humidade ou as poeiras, os efeitos de reacções químicas, as radiações electromagnéticas, as temperaturas extremas ou outras situações adversas que poderão conduzir a situações de corrosão ou de poluição.

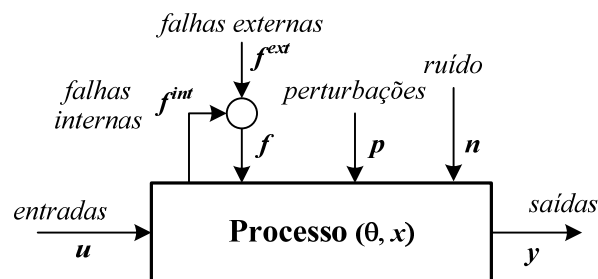


Figura 2.1: Representação de um processo em malha aberta sujeito a falhas.

Consequentemente, as falhas podem alterar os parâmetros do processo dinâmico, tais como variações da resistência, da capacitância ou da dureza de elementos do processo, e/ou as suas variáveis de estado tais como variações do caudal mássico, de deslocamentos, correntes eléctricas ou de temperaturas.

As alterações dos parâmetros do processo  $\theta(t)$  podem ser representadas por  $\Delta\theta(t)$ , enquanto as variações das variáveis de estado  $x(t)$ , que não são frequentemente mensuráveis, podem ser indicadas por  $\Delta x(t)$ . Tendo em conta as características dinâmicas do processo, a influência das falhas nas saídas mensuráveis  $y(t)$  pode ser sintetizada por  $\Delta y(t)$ . De referir ainda que as saídas  $y(t)$  também reflectem os efeitos de perturbações  $p(t)$ , de ruído  $n(t)$  e de variações das entradas controláveis  $u(t)$ .

Num processo em malha aberta, a ocorrência de uma falha persistente  $f(t)$  resulta, geralmente, num desvio permanente das saídas,  $\Delta y(t)$ . No entanto, se o processo for controlado em malha fechada (Figura 2.2), o efeito da falha poderá ter um comportamento diferente, originando um desvio das entradas controláveis  $\Delta u(t)$  e uma alteração pouco significativa das saídas. Dependendo da evolução temporal da variação dos parâmetros  $\Delta\theta(t)$  e das variáveis de estado  $\Delta x(t)$ , o efeito da falha nas saídas do sistema poderá ser transitório e até ser anulado se o sistema de controlo tiver características que satisfaçam o princípio do modelo interno (Wonham, 1974), o qual se traduz, em muitos casos, pelo controlador possuir um comportamento integrador.

Nestes casos e considerando um sistema de supervisão que considera unicamente a informação da saída do sistema, a falha poderá não ser detectável.

A principal razão para isso, deriva do facto do sistema de controlo compensar, além das perturbações, o efeito da falha, traduzido na variação dos parâmetros e das variáveis de estado. Poder-se-á assim dizer que as falhas poderão ser compensadas num sistema em malha fechada. Uma situação diversa poderá ocorrer se a falha originar uma variação significativa das entradas controláveis  $u(t)$ , levando-as a atingir valores extremos (saturação) e, conseqüentemente, a provocar desvios permanentes nas saídas mensuráveis.

Deste modo, é importante que a supervisão de sistemas controlados em malha fechada considere a monitorização das entradas  $u(t)$ , para além da usualmente efectuada sobre as saídas mensuráveis  $y(t)$ .

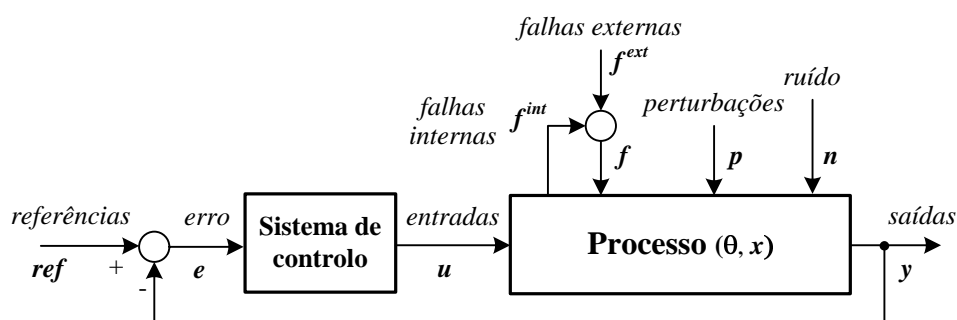


Figura 2.2: Diagrama de um processo em malha fechada sujeito a falhas.

A supervisão de processos em funcionamento normal ou o controlo de qualidade de produtos manufacturados, usando métodos clássicos, considera habitualmente os testes de verificação de ultrapassagem de limites funcionais (*limit-checking*) ou de limiares predefinidos (*threshold checking*) de um conjunto de saídas mensuráveis  $y(t)$  como, por exemplo, níveis de líquidos, pressões, forças, temperaturas, velocidades ou deslocamentos. Basicamente, os testes permitem verificar se o valor de cada saída medida se encontra dentro de um intervalo de valores admissíveis, ou seja, se  $y_{\min} < y(t) < y_{\max}$ , e, caso isso não aconteça, gerar um alarme indicativo dessa ocorrência.

Assim, considerando a hierarquia de supervisão e controlo de processos apresentada na Figura 2.3, a primeira tarefa de um sistema de supervisão é a de monitorização, processando e analisando os sinais mensuráveis e gerando alarmes para o supervisor humano, sempre que alguma situação anómala seja detectada. Após a ocorrência do alarme, o supervisor humano deverá tomar medidas adequadas à reposição do funcionamento normal do processo.

Sempre que a ultrapassagem dos limites associados a cada sinal corresponda a um estado crítico do processo, o sistema de supervisão deve gerar automaticamente as acções necessárias para que o processo retome um estado de segurança. Esta operação corresponde à segunda tarefa do supervisor, denominada por protecção automática, traduzindo-se, frequentemente, pela interrupção forçada do funcionamento do processo.

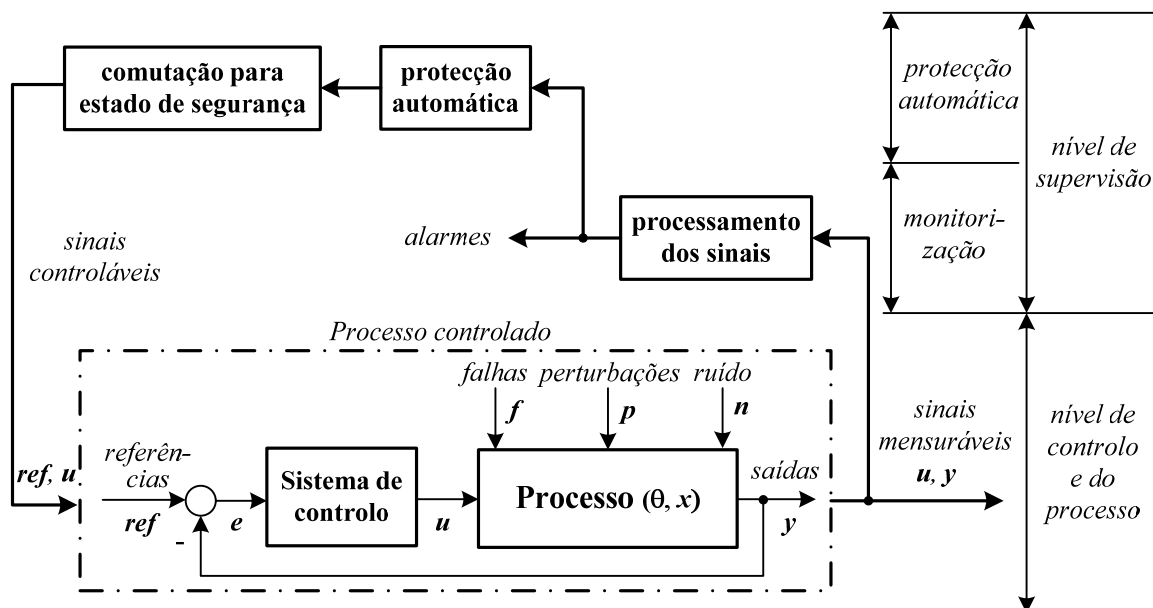


Figura 2.3: Monitorização e protecção automática na supervisão clássica de um processo dinâmico.

Na Tabela 2.1 apresentam-se alguns exemplos de acções de protecção automática para que o processo possa comutar para um estado de segurança.

Tabela 2.1: Exemplos de acções de protecção automática.

Componentes	Falha	Ação de protecção
Fio eléctrico	Curto-circuito	Interrupção de corrente
Motor eléctrico	Sobreaquecimento	Interrupção de corrente
Sistema de aquecimento	Sobreaquecimento	Interrupção do fornecimento de energia
Tanques e tubagens	Fuga	Desactivação do tanque ou tubagem

Considerando métodos clássicos para a monitorização e protecção automática, a definição dos limites dos intervalos de admissibilidade de cada sinal mensurável estará sujeita ao compromisso entre a detecção correcta dos desvios indicativos de situações de funcionamento anormal e os falsos alarmes gerados por flutuações dos sinais, devidas a não linearidades do processo ou ao efeito de perturbações e ruído.

Embora a análise dos sinais mensuráveis usando limites fixos possa ser simples e fiável quando os sinais apresentam um comportamento essencialmente estacionário e independente do regime de operação do processo, a detecção das situações anómalas só é eficaz quando se verificam alterações significativas do comportamento do processo.

Uma possibilidade de melhorar a supervisão de processos ou o controlo de qualidade de produtos consistiria na introdução de sensores adicionais para a medição de sinais que estejam directamente relacionados com as falhas que se pretendem detectar e na implementação computacional dos conhecimentos de monitorização dos supervisores humanos.

No entanto, a utilização de novo equipamento (sensores, cabos, transmissores ...) poderá não ser viável quer por dificuldades de implementação quer por razões económicas, e a tradução computacional das regras que os supervisores humanos consideram nem sempre é uma tarefa fácil de concretizar, necessitando, muitas vezes, de ser complementada com a introdução de modelos do processo.

Além disso, em processos complexos com a monitorização de muitos sinais, a ocorrência de uma falha crítica poderá desencadear uma sequência de diversos alarmes num espaço de tempo reduzido, o que dificultará a detecção da causa do comportamento anormal do processo e, conseqüentemente, a correcta reacção dos supervisores humanos.

Deste modo, para que a melhoria do sistema de supervisão seja efectiva será necessário considerar métodos avançados para a detecção e diagnóstico das falhas e para a supervisão de um processo, satisfazendo os seguintes requisitos:

- i) Detecção e diagnóstico precoce de falhas, incluindo as de pequena dimensão, com um comportamento temporal abrupto ou incipiente;
- ii) Diagnóstico de falhas que ocorram no processo, nomeadamente em componentes do processo, nos subsistemas de actuação (actuadores) e nos subsistemas de medição (sensores);
- iii) Detecção de falhas em processos controlados em malha fechada;
- iv) Supervisão do processo em estados transitórios.

De referir que a detecção e o diagnóstico atempado das falhas é um factor fundamental para o êxito do supervisor pois, desse modo, haverá tempo suficiente para efectuar as operações necessárias à supervisão do processo, tais como a acomodação das falhas, a reconfiguração do processo e a manutenção ou reparação dos elementos que apresentem um funcionamento defeituoso.

Assim, o sistema de supervisão deve incluir novos elementos que permitam atingir os objectivos de uma forma automática, além dos que realizam as operações clássicas de monitorização e de protecção. Na Figura 2.4 é apresentado um diagrama geral de um sistema de supervisão onde se procura gerar mais informação sobre o processo, integrando todos os sinais mensuráveis e os modelos matemáticos existentes do processo.

Com a existência de informação mais detalhada sobre o processo e sobre a forma como os vários sinais de entrada influenciam o seu comportamento, será expectável que o efeito das falhas nos sinais mensuráveis se distinga do efeito das perturbações e do ruído e, assim, diagnosticar as falhas e gerar as acções necessárias para evitar as avarias e o funcionamento defeituoso do processo.

Os módulos que integram o nível de supervisão com diagnóstico de falhas realizam as seguintes tarefas:

- i) Geração de características (*feature generation*): usando os sinais mensuráveis obtém-se um conjunto de características do processo, aplicando, por exemplo, métodos de processamento de sinal, de estimação dos estados, de identificação ou de estimação de parâmetros ou de relações de paridade.

- ii) Detecção de falhas (*fault detection*): determina-se a existência de falhas e o instante temporal da sua detecção, gerando sintomas analíticos ou heurísticos a partir da caracterização efectuada pelo módulo anterior.
- iii) Diagnóstico de falhas (*fault diagnosis*): detectada a ocorrência das falhas, esta tarefa consiste em efectuar o seu isolamento e a sua estimação, determinando o tipo, a dimensão e a localização de cada falha. Para isso considera-se os sintomas e as suas relações com as falhas, usando, por exemplo, métodos de classificação.
- iv) Avaliação de falhas (*fault evaluation*): assumindo o diagnóstico completo das falhas, efectua-se a sua classificação em classes de risco (*hazard classes*). Alguns exemplos de classes de risco são apresentados na Tabela 2.2.
- v) Decisão (*decision*): dependendo da classe de risco e do correspondente grau de perigosidade, são geradas acções automáticas de paragem, de mudança de operação ou de reconfiguração, ou acções de manutenção ou de reparação, envolvendo, normalmente, a intervenção humana. As acções poderão ser decididas pelo supervisor de uma forma automática ou pelo supervisor humano.

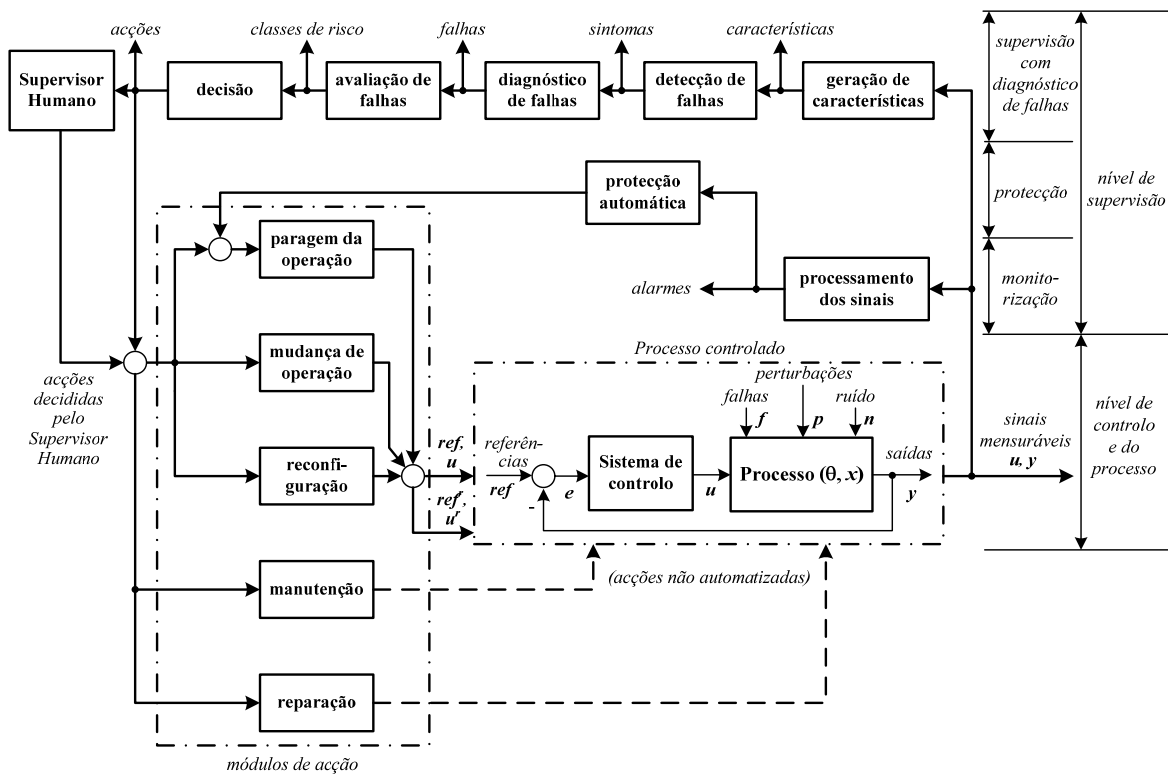


Figura 2.4: Diagrama geral de um sistema de supervisão de um processo dinâmico.

A implementação das tarefas de supervisão e de diagnóstico de falhas permitirá obter um conhecimento mais profundo sobre o modo de funcionamento do processo e, desse modo, decidir de uma forma mais eficaz quais as acções a realizar quando ocorrerem situações de falha.

Tabela 2.2: Exemplos de classes de risco para a classificação de falhas.

Classe de risco	Implicação na		Acções		Exemplo
	Segurança	Fiabilidade	Durante a operação	Depois da operação	
1	alta	alta	desactivação urgente em segurança	reparação	ruptura de uma tubagem em uso
2	média	alta	reconfiguração	reparação	válvula bloqueada na posição de fechada
3	média	média	mudança do estado de operação	manutenção	tubagem com uma fuga pouco significativa
4	nenhuma	alta	mudança para um estado fiável	reparação	válvula bloqueada na posição de aberta
5	nenhuma	baixa	nenhuma	manutenção	bomba com um débito máximo ligeiramente inferior ao estabelecido

Para a concretização e gestão dessas acções é necessário considerar outras tarefas que possibilitem a melhoria da fiabilidade e da segurança do processo, como as que a seguir se indicam:

- i) Desactivação urgente em segurança (*safe operation*): corresponde à paragem da operação do sistema se existir um perigo iminente para o processo ou para o ambiente circundante;
- ii) Funcionamento confiável (*reliable operation*): traduz-se pela realização de operações de acomodação de falhas e/ou de alteração do modo de funcionamento, de forma a impedir a propagação do efeito de uma falha (ou avaria) a outros componentes do sistema;
- iii) Reconfiguração (*reconfiguration*): operação que pretende manter o processo em funcionamento de uma forma controlada usando uma estrutura alternativa do sistema, baseada na redundância física ou analítica de componentes (sensores, actuadores ou componentes do processo);
- iv) Inspeção (*inspection*): utilização de medições adicionais para obtenção de um diagnóstico detalhado do modo de funcionamento do processo;
- v) Manutenção (*maintenance*): operação que estabelece a alteração de parâmetros do sistema ou a intervenção em componentes do processo, como resultado da reconfiguração do sistema (libertando o componente a necessitar de intervenção) ou de uma decisão programada;
- vi) Reparação (*repair*): operação que promove a substituição de componentes com avaria.

Estas tarefas são consideradas operações de gestão de falhas e podem incluir outras acções, principalmente, quando sistemas com redundância se encontram num estado crítico em termos de segurança.

Deste modo, os mecanismos de supervisão procuram gerar acções que, em termos gerais, possibilitem a melhoria da fiabilidade e da segurança dos sistemas. Para que isso aconteça, além do desenvolvimento de metodologias adequadas, é também necessário que os componentes constituintes do processo apresentem um grau de fiabilidade elevado.

### 2.3.1 A Terminologia

A terminologia usada nesta dissertação procura seguir as definições propostas pelo IFAC *Technical Committee SAFEPROCESS (Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes)* e em referências como Isermann and Ballé (1997) e van Schrick (1997). Das várias definições apresentadas no Apêndice A, referem-se as seguintes:

**Definição 2.2 (Detecção de falhas):** Determinação da presença de falhas num sistema, gerando uma decisão binária que indica que algo ocorreu de errado ou que tudo está normal.

**Definição 2.3 (Isolamento de falhas):** Determinação do tipo, da localização e do instante de ocorrência das falhas (posterior à detecção das falhas), possibilitando o conhecimento de qual o componente do sistema onde ocorreu a falha.

**Definição 2.4 (Identificação de falhas):** Determinação da dimensão e do comportamento temporal da falha (posterior ao isolamento das falhas).

**Definição 2.5 (Diagnóstico de falhas):** Determinação do tipo, da dimensão, da localização e do instante de ocorrência das falhas (posterior à detecção das falhas; inclui o isolamento e a identificação das falhas).

**Definição 2.6 (Tolerância a falhas):** Capacidade de um sistema controlado manter os objectivos de controlo, apesar da ocorrência de uma falha. A degradação do desempenho de controlo pode ser admitida. A tolerância a falhas pode ser obtida através da acomodação das falhas ou pela reconfiguração do sistema e/ou do controlador.



## 2.4 Classificação das Falhas

Tal como foi referido na secção anterior, as falhas são eventos que podem influenciar e alterar o comportamento dos diversos componentes que constituem um processo e o sistema de controlo. Neste trabalho não são consideradas as falhas que possam afectar o sistema automático de controlo (usualmente, um computador ou um autómato) propriamente dito, situação que é investigada, por exemplo, em Cunha (2002, 2003).

No contexto dos sistemas de controlo tolerantes a falhas, as falhas são classificadas de acordo com a sua localização no sistema, conforme se representa na Figura 2.5. Nesta figura o processo estabelece o relacionamento entre as entradas  $u_p(t)$  e as saídas  $y_p(t)$ , estando sujeito a falhas  $f_c(t)$  e a perturbações  $p(t)$ .

A entrada do processo é obtida a partir do actuador que recebe o sinal de controlo  $u(t)$ , fornecido pelo sistema de controlo, podendo ser influenciada pela falha no actuador  $f_a(t)$  e a sua saída é medida pelos sensores que fornecem as saídas  $y(t)$  que estão sujeitas a falhas no sensor  $f_s(t)$ .

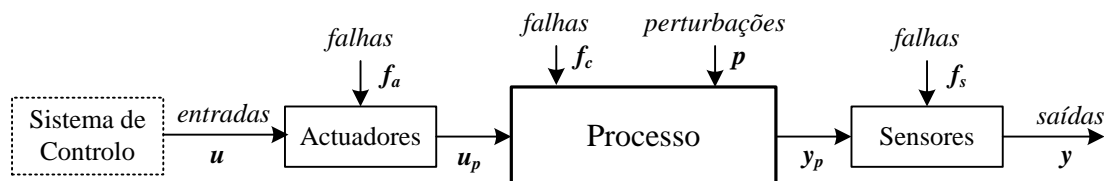


Figura 2.5: Localização das falhas num sistema controlado.

Deste modo, as falhas podem ser denominadas como:

- i) **falhas nos actuadores** (*actuator faults*): provocam a alteração parcial ou a perda total da acção dos actuadores sobre o processo (a acção de controlo em processos controlados). A falha parcial do actuador pode introduzir um desvio do valor desejado ou uma diminuição da gama de funcionamento do actuador. O desvio pode resultar, usualmente, de uma fuga (hidráulica ou pneumática), da alteração de um elemento do actuador (por exemplo, uma resistência, uma bobine ou uma membrana) ou da tensão de alimentação, ou ainda da alteração da relação entrada-saída do actuador (por exemplo, o ganho, a zona morta (*dead zone*), a histerese ou a resposta em frequência). As falhas de saturação (*saturation faults*) alteram os valores limites entre os quais o sinal de saída do actuador pode variar. Relativamente à falha total do actuador, o sinal de saída mantém-se inalterado independentemente do sinal à entrada variar. Esta situação pode ocorrer, por exemplo, devido ao encravamento ou à quebra do elemento actuador (mecânico), ou à desactivação de um circuito eléctrico devido a um curto-circuito ou ao corte de uma ligação;

- ii) **falhas nos sensores** (*sensor faults*): representam uma incorrecção no valor de uma variável, medido por um sensor associado a uma grandeza do processo. Podem também ser divididas em parciais ou totais. As falhas parciais produzem uma leitura que está relacionada com o sinal medido, possibilitando de alguma forma que o valor real seja recuperado. Um exemplo deste tipo de falhas é uma alteração das características do sensor (ganho, offset, histerese, relação sinal-ruído, ...). Se se verificar a falha total do sensor, o valor lido mantém-se inalterado ou varia de uma forma que não está relacionada com o valor real da grandeza medida. Podem resultar, por exemplo, da quebra de ligações eléctricas, da danificação do elemento sensor ou da sua deslocalização;
- iii) **falhas nos componentes** (*component faults*): são falhas nos componentes do próprio processo, reunindo todas as falhas que não possam ser categorizadas como falhas nos actuadores ou nos sensores. Estas falhas representam alterações nos parâmetros do processo como, por exemplo, massas, coeficientes aerodinâmicos, ou outros parâmetros do processo, que podem resultar de avarias estruturais. Usualmente, têm como consequência a alteração do comportamento dinâmico do processo. O projecto dum sistema com tolerância às falhas nos componentes apresenta maior dificuldade devido à sua diversidade e à grande abrangência de situações.

As falhas podem ainda ser classificadas de acordo com as suas características temporais e com a forma como são modelizadas. Assim, em termos temporais, as falhas dizem-se abruptas, incipientes ou intermitentes de acordo com a evolução temporal, tal como apresentado na Figura 2.6.

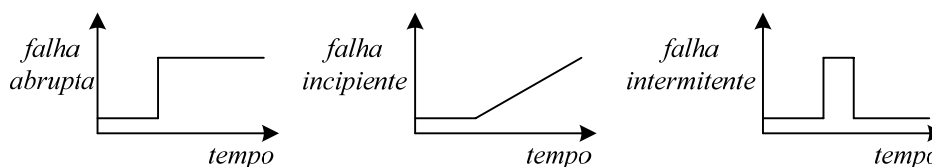


Figura 2.6: Tipo de falhas em função das suas características temporais.

As falhas abruptas ocorrem instantaneamente e são normalmente persistentes no tempo, enquanto que as falhas incipientes representam evoluções lentas no tempo. Estas são mais difíceis de detectar embora apresentem, na fase inicial, menor severidade (*severity*). As falhas intermitentes apresentam um comportamento semelhante a pulsos temporais, aparecendo e desaparecendo rapidamente.

Relativamente à classificação das falhas quanto à forma como são modelizadas, as falhas podem ser aditivas ou multiplicativas, conforme a representação da Figura 2.7.

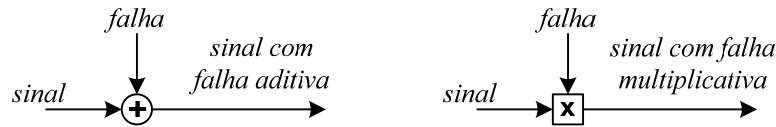


Figura 2.7: Tipo de falhas em função da sua modelização.

## 2.5 Modelização das Falhas

Nesta secção pretende-se apresentar a representação matemática das falhas e discutir o uso mais apropriado das falhas aditivas ou multiplicativas.

Ao longo desta dissertação, a representação no espaço de estados de um sistema dinâmico linear que estabelece a relação entre as entradas do sistema  $u(t) \in \mathcal{R}^{n_u}$  e as saídas mensuráveis  $y(t) \in \mathcal{R}^{n_y}$  é escrita na forma:

$$S^{nom} : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

em que  $x(t) \in \mathcal{R}^{n_x}$  representa os estados do sistema. Nesta representação admite-se que o sistema engloba os actuadores, os sensores e o processo propriamente dito.

Na presença de falhas, considera-se, usualmente, que as falhas nos actuadores actuam sobre as entradas do actuador,  $u(t)$  e as falhas nos sensores actuam sobre as saídas dos sensores,  $y(t)$

### 2.5.1 As Falhas Multiplicativas

As falhas no actuador, representando o seu funcionamento inadequado, podem ser modelizadas como alterações abruptas da acção de controlo nominal  $u(t)$  para:

$$u^f(t) = u(t) + (I - \Sigma_A)(u - u(t)) \quad (2.2)$$

em que  $u \in \mathcal{R}^{n_u}$  é um vector (não necessariamente constante) que não pode ser manipulado e onde:

$$\Sigma_A = \text{diag} \left\{ \left[ \begin{array}{cccc} \sigma_1^a & \sigma_2^a & \dots & \sigma_{n_u}^a \end{array} \right] \right\}, \quad \sigma_i^a \in \mathcal{R}, \quad i = 1, 2, \dots, n_u.$$

Os coeficientes  $\sigma_i^a$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_u$  podem apresentar valores entre 0 e 1, representando falhas parciais no  $i$ -ésimo actuador.

Para  $\sigma_i^a = 0$  obtém-se a representação de uma falha total do  $i$ -ésimo actuador, fazendo com que a saída desse actuador corresponda ao  $i$ -ésimo elemento do vector  $\mathbf{u}$ , ou seja,  $u^f(t) = \mathbf{u}(i)$ . Por outro lado, se  $\sigma_i^a = 1$  então o  $i$ -ésimo actuador estará a funcionar normalmente ( $u^f(t) = u(t)$ ).

Substituindo a acção de controlo nominal  $u(t)$  na equação (2.1) pela acção com falha,  $u^f(t)$ , dada por (2.2), obtém-se a seguinte representação no espaço de estados:

$$S^{f^a, mult} : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B\Sigma_A u(t) + B(I - \Sigma_A)\mathbf{u} \\ y(t) = Cx(t) + D\Sigma_A u(t) + D(I - \Sigma_A)\mathbf{u} \end{cases} \quad (2.3)$$

Os modelos na forma de (2.3) representam os modelos de falhas multiplicativas e têm sido largamente utilizados em trabalhos de FTC (por exemplo, Noura *et al.*, 2000; Tao *et al.*, 2001; Boskovic and Mehra, 2003).

De referir que embora as falhas no actuador não afectem directamente a dinâmica do controlador, elas podem afectar de forma significativa o comportamento dinâmico de todo o sistema em malha fechada, podendo mesmo colocar em causa a controlabilidade do sistema. O Exemplo 2.1 mostra como uma falha parcial de 30% no ganho do actuador pode provocar a instabilidade do sistema em malha fechada.

De forma semelhante, as falhas nos sensores do sistema dado por (2.1) representam leituras incorrectas realizadas pelos sensores, fazendo com que o valor medido,  $y^f(t)$ , seja diferente do valor real da variável,  $y(t)$  (assumindo que  $y(t)$  corresponde correctamente a  $y_p(t)$ ). As falhas multiplicativas nos sensores podem ser modelizadas como:

$$y^f(t) = y(t) + (I - \Sigma_S)(\mathbf{y} - y(t)) \quad (2.4)$$

em que  $\mathbf{y} \in \mathcal{R}^{n_y}$  é um vector de *offset* e onde

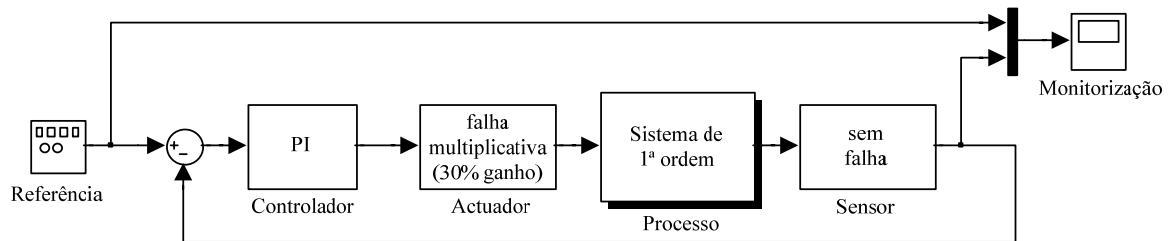
$$\Sigma_S = \text{diag} \left\{ \left[ \begin{array}{cccc} \sigma_1^s & \sigma_2^s & \dots & \sigma_{n_y}^s \end{array} \right] \right\}, \quad \sigma_j^s \in \mathcal{R}, \quad j = 1, 2, \dots, n_y.$$

Tal como no caso dos actuadores, os coeficientes  $\sigma_j^s$ ,  $j = 1, 2, \dots, n_y$ , apresentam valores que variam entre 0 e 1, representando falhas parciais no  $j$ -ésimo sensor. Para  $\sigma_j^s = 0$  obtém-se a representação de uma falha total do  $j$ -ésimo sensor ( $y(t) = \mathbf{y}(j)$ ), e para  $\sigma_j^s = 1$  o seu funcionamento normal ( $y(t) = y_p(t)$ ).

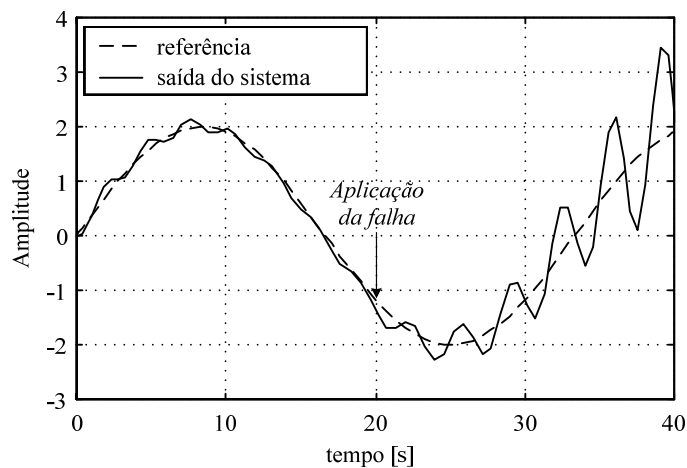
Substituindo a as medições nominais  $y(t)$  na equação (2.1) pela acção com falha,  $y^f(t)$ , obtém-se a seguinte representação no espaço de estados para as falhas multiplicativas nos sensores:

$$S^{f^s, mult} : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = \Sigma_S Cx(t) + \Sigma_S Du(t) + D(I - \Sigma_S)\mathbf{y} \end{cases} \quad (2.5)$$

**Exemplo 2.1 (Efeito de uma falha multiplicativa no actuador):** Um processo de 1ª ordem representado pela sua função de transferência  $G(s) = \frac{1}{s-1}$  é controlado por um controlador do tipo PI, dado por  $D(s) = 1.1 + \frac{5}{s}$ , por realimentação da sua saída (sistema representado na Figura 2.8-a)). Conforme se pode observar na Figura 2.8-b), nos primeiros 20 segundos, a saída do sistema segue a trajectória sinusoidal da referência, em condições normais de funcionamento. No instante  $t=20s$  é aplicada uma falha multiplicativa no actuador (correspondendo a uma perda de 30% no ganho do actuador), verificando-se consequentemente a instabilidade do sistema em malha fechada. Este é um exemplo muito simples que pretende mostrar que o aparecimento de falhas, mesmo parecendo inofensivas, poderá provocar a degradação significativa do desempenho do sistema ou, como neste caso, a sua instabilidade.



a) Diagrama de simulação do sistema em malha fechada.



b) Gráfico com a referência sinusoidal e a saída do sistema.

Figura 2.8: Efeito de instabilidade provocado por uma falha multiplicativa num sistema.

Considerando simultaneamente as representações das falhas multiplicativas nos actuadores e nos sensores, obtém-se:

$$S^{f,mult} \cdot \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B\Sigma_A u(t) + B_f(\Sigma_A, u) \\ y(t) = \Sigma_S Cx(t) + \Sigma_S D\Sigma_A u(t) + D_f(\Sigma_A, \Sigma_S, u, y) \end{cases} \quad (2.6)$$

com

$$\begin{aligned} B_f(\Sigma_A, u) &= B(I - \Sigma_A)u \\ D_f(\Sigma_A, \Sigma_S, u, y) &= \Sigma_S D(I - \Sigma_A)u + (I - \Sigma_S)y \end{aligned}$$

Deste modo, pode-se considerar que o modelo multiplicativo permite representar uma grande variedade de falhas nos actuadores e nos sensores, embora seja pouco utilizado na representação de falhas nos componentes.

### 2.5.2 As Falhas Aditivas

A representação de falhas como falhas aditivas é mais geral do que como falhas multiplicativas. O modelo de um sistema no espaço de estados com falhas aditivas tem a seguinte representação geral:

$$S^{f,adit} : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ff(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + Ef(t) \end{cases} \quad (2.7)$$

em que  $f(t) \in \mathcal{R}^{n_f}$  é um vector que descreve as falhas presentes no sistema.

Esta representação é, usualmente, considerada para modelizar uma grande variedade de classes de falhas em sensores, em actuadores e nos componentes. No entanto, a utilização do modelo (2.7) pode fazer com que a falha  $f(t)$  se relacione com um ou mais dos sinais  $u(t)$ ,  $y(t)$  ou  $x(t)$ . Por exemplo, representando uma falha total em todos os actuadores (fazendo  $\Sigma_A = 0$  e  $u = \mathbf{0}$  na equação (2.2)) como uma falha aditiva, para que o modelo (2.7) seja equivalente ao modelo (2.3), a falha  $f(t)$  tem de satisfazer a relação  $\begin{bmatrix} F \\ E \end{bmatrix} f(t) = -\begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} \Sigma_A u(t)$ , fazendo com que  $f(t)$  dependa de  $u(t)$ . Assim, o facto do sinal da falha vir expresso em função da acção de controlo não contribui para uma situação desejável do ponto de vista de projecto do controlador. Acresce que  $f(t)$  é independente de  $u(t)$  quando se utiliza a representação multiplicativa.

Outra desvantagem do modelo aditivo, quando se pretende representar as falhas nos sensores e nos actuadores, consiste na dificuldade em distinguir as falhas, em termos das relações entrada-saída. Com efeito, considere-se que as falhas nos sensores e nos actuadores são representadas pelo seguinte modelo:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ff^a(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + Ef^s(t) \end{cases}$$

Usando a transformada de Laplace, a correspondente relação entrada-saída vem dada por:

$$Y(s) = \left( C(zI - A)^{-1} B + D \right) U(s) + C(zI - A)^{-1} F F^a(s) + E F^s(s).$$

Assim, pode-se verificar que o efeito na saída do sistema de uma falha no actuador pode ser modelizada não só pelo sinal  $f^a(t)$ , mas também por  $f^s(t)$ .

Uma vantagem da representação aditiva relativamente à multiplicativa, tal como já referido, é a sua maior versatilidade para representar uma maior diversidade de classes de falhas. Além disso, a sua utilização no projecto de estruturas de detecção e diagnóstico de falhas – FDD (*Fault Detection and Diagnosis*) é mais apropriada dado que as falhas são representadas por sinais, enquanto que no caso multiplicativo, são representadas por alterações nas matrizes do sistema.

Por este facto, a maioria dos métodos de FDD baseiam-se na representação aditiva das falhas (Basseville, 1998; Gertler, 2000; Frank *et al.*, 2000a; Kinnaert, 2003).

### 2.5.3 As Falhas nos Componentes

A classe de falhas em componentes do sistema foi definida na secção 2.4 como a mais genérica, tendo em consideração que pode incluir as falhas que agem sobre, praticamente, qualquer elemento do sistema. Foi referido que correspondem a todas as falhas que não podem ser classificadas como falhas nos sensores ou nos actuadores. Uma falha num componente pode introduzir alterações em cada matriz do sistema pois estas podem depender do parâmetro físico que sofreu a falha. As falhas nos componentes são usualmente modelizadas com o formato de um sistema linear de parâmetros variáveis – LPV (*linear parameter-varying*):

$$S^{f^c, comp} : \begin{cases} \dot{x}(t) = A(f^c)x(t) + B(f^c)u(t) \\ y(t) = C(f^c)x(t) + D(f^c)u(t) \end{cases}, \quad (2.8)$$

em que  $f^c \in \mathcal{R}^{n_{f^c}}$  é um vector de parâmetros que representa as falhas nos componentes do sistema.

Como é evidente, este modelo também pode ser usado para adicionar a representação das falhas nos sensores e nos actuadores. Dado que as matrizes do sistema podem depender da falha  $f$  de uma forma não linear, este modelo é menos adequado para a detecção e diagnóstico das falhas. Mais à frente, será apresentada uma formulação para o controlo tolerante a falhas considerando o modelo (2.8) e quando se assume que a falha  $f$  pertence a um determinado intervalo de incerteza com uma dimensão variável no tempo.

Referidas as formas de representação das várias classes de falhas, aborda-se, na próxima secção, a estrutura e os principais componentes de um sistema de controlo tolerante a falhas (FTCS).

## 2.6 Principais Componentes de um FTCS

Os sistemas de controlo tolerante a falhas (FTCS) estão usualmente divididos em dois grandes grupos: os passivos (*passive*) e os activos (*active*). O projecto de um FTCS passivo baseia-se em técnicas de controlo robusto e o seu objectivo principal consiste em sintetizar um controlador com propriedades robustas, que garanta que o sistema em malha fechada seja insensível a determinadas falhas. Esta abordagem não requer a detecção *online* das falhas o que a torna mais atractiva do ponto de vista computacional.

Apesar disso, a sua aplicabilidade apresenta algumas restrições devido às limitações que apresenta, das quais se destacam:

- i) Para garantir a robustez em relação às falhas, só um subconjunto relativamente restrito de falhas pode ser considerado. Tipicamente, só as falhas que apresentam um efeito menos significativo no comportamento do sistema podem ser abordadas por esta metodologia.
- ii) Verifica-se frequentemente que a obtenção de uma maior robustez, relativamente a determinadas falhas, só é possível à custa de uma diminuição do desempenho nominal do sistema. Dado que se admite que as falhas são eventos que acontecem com pouca frequência, não é, muitas vezes, razoável degradar significativamente o desempenho do sistema sem falhas, unicamente para obter a insensibilidade a um conjunto restrito de falhas.

Em oposição às metodologias passivas, as abordagens activas para o projecto do FTCS baseiam-se, essencialmente, no re-projecto do controlador, ou na selecção ou combinação de controladores previamente projectados para as várias situações previstas. Estas técnicas pressupõem, usualmente, a existência de um sistema de detecção e de diagnóstico de falhas (FDD) que realiza a tarefa de detectar, isolar e identificar as falhas que ocorram no sistema. A estrutura geral de um FTCS baseado num FDD é representada na Figura 2.9.

O sistema de FDD usa as medições das entradas e das saídas do processo para detectar e localizar as falhas. Como resultado do sistema de diagnóstico obtém-se a estimação das falhas para o subsequente envio ao sistema de supervisão (*supervision system*), onde se procede à acomodação das falhas. Neste sistema, existe um mecanismo de reconfiguração que decide sobre a modificação dos parâmetros e/ou da estrutura do controlador de modo a garantir que o efeito da falha (*fault effect*) não se propague ao restante sistema nem evolui para um estado de avaria e que o desempenho do sistema, após a ocorrência da falha, não se degrade significativamente.

Dependendo da forma como o controlador é reconfigurado, os métodos activos de FTC podem ser subdivididos em métodos baseados na projecção (*projection-based*) ou de re-projecto *online* (*online re-design*). Os primeiros baseiam-se na selecção de um controlador a partir de um conjunto de controladores previamente projectados. Usualmente, cada um desses controladores é projectado para uma situação de falha em particular e a comutação é efectuada pelo mecanismo de reconfiguração (RM) sempre que o padrão de falha (*fault pattern*) correspondente é diagnosticado pelo sistema de FDD.



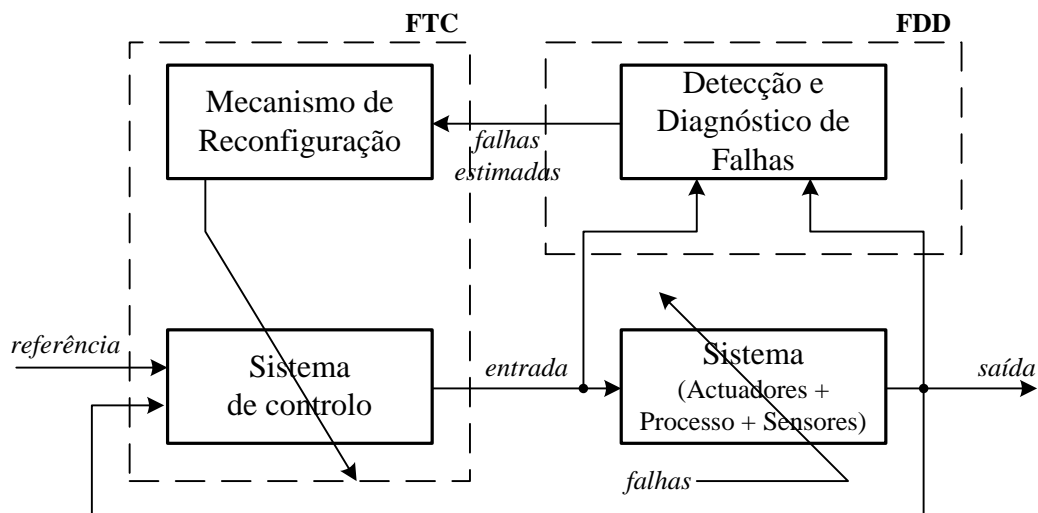


Figura 2.9: Representação dos principais componentes de um FTCS.

Desta forma, estes métodos aplicam-se essencialmente quando as falhas a tratar pertencem a uma classe finita de falhas. Relativamente aos métodos de re-projecto do controlador, estes podem envolver o cálculo *online* dos parâmetros do controlador, denominando-se controlo adaptativo ou reconfigurável (*reconfigurable control*), ou o cálculo dos parâmetros e a determinação de uma nova estrutura para o controlador, obtendo-se neste caso o controlo reestruturável (*restructurable control*). Comparando o desempenho dos métodos referidos, perante a ocorrência de uma falha, é previsível que o dos métodos que possibilitam o re-projecto *online* seja superior ao dos métodos passivos ou que se baseiam na projecção *offline*. No entanto, aqueles métodos são os que consomem mais recursos computacionais, dado que, frequentemente, se transformam em problemas de optimização *online*.

Existem várias questões importantes que se levantam aquando do projecto de um FTCS activo. Provavelmente, o mais significativo corresponde à interacção entre o sistema de FDD e o sistema de FTC. Uma grande parte das abordagens referidas na literatura foca-se num destes sistemas deixando em aberto o outro sistema ou considerando-o perfeito. Especificando melhor, por um lado, muitos algoritmos de FDD não consideram o sistema global em malha fechada, por outro lado, muitos métodos de FTC assumem a existência de uma estimação perfeita das falhas pelo sistema de FDD. A não consideração da interligação entre esses métodos apresenta uma forte probabilidade de fracasso e não garante que o desempenho obtido após a ocorrência das falhas seja satisfatório ou que a estabilidade global do sistema seja assegurada. Deste modo, quando os projectos dos sistemas de FDD e de FTC são realizados em separado, é fundamental que se considere que o outro sistema pode apresentar imperfeições. Para que a interligação dos dois sistemas seja realizada com êxito torna-se preponderante determinar que informação o FTCS necessita do sistema de FDD e que informação pode, efectivamente, ser fornecida por este sistema.

Se o sistema de FDD fornecer informação imprecisa e se o sistema de FTC interpretar incorrectamente essa informação, o sistema global em malha fechada pode perder completamente a sua estabilidade.

Uma situação usual em termos práticos, consiste na inexistência, logo após a ocorrência de uma falha no sistema, de informação suficiente em termos de medições dos sinais de entrada e de saída para que o sistema de FDD efectue o diagnóstico da falha. É por esta razão que somente após um determinado intervalo de tempo (desejavelmente curto) e com mais informação disponível é possível efectuar a detecção da ocorrência da falha pelo sistema de FDD e, passado mais algum tempo, localizar a falha e determinar a sua amplitude.

Daqui resulta que a informação fornecida ao FTCS apresenta, inicialmente, uma maior imprecisão e incerteza, evoluindo em precisão conforme se vão obtendo mais dados do sistema. Assim, o FTCS deve estar projectado de forma a considerar esta situação como transitória. Pode-se então dizer que o sistema de FTC deve ser capaz de tratar a informação (estimação da falha) com incerteza, proveniente do sistema de FDD, e actuar em conformidade durante este período de tempo transitório, garantindo, pelo menos, a estabilidade do sistema até que seja efectuado o diagnóstico da falha.

Frequentemente, os processos apresentam um comportamento dinâmico não linear que não pode ser representado por um modelo linear com precisão suficiente, sendo, portanto, necessário considerar um modelo não linear. Deste modo, as técnicas de desenvolvimento do FTCS devem poder considerar, de uma forma explícita, as não linearidades da representação analítica do processo.

Uma situação importante a ter em consideração no projecto de um FTCS diz respeito à aproximação, que seja possível realizar, de um processo não linear por uma representação linear para um determinado modo de operação. O modelo linear obtido nem sempre apresenta uma boa precisão devido, essencialmente, ao facto de que os parâmetros físicos do processo nem sempre são bem conhecidos ou são variantes no tempo. Refira-se que a obtenção do próprio modelo não linear é, muitas vezes, baseado em hipóteses simplificadoras, fazendo com que também represente aproximadamente o comportamento dinâmico do processo. O facto da linearização consistir basicamente na eliminação dos termos de segunda ordem e de ordem superior da expansão em série de Taylor das funções não lineares que representam o processo, vem contribuir para que a incerteza da representação aumente. Daqui resulta que um processo é usualmente representado por modelos com incerteza. Assim, pode-se afirmar que o projecto de um sistema FTC deve ser robusto em relação às incertezas do modelo que representa o processo.

Outro aspecto importante a considerar consiste no facto da acção de controlo dos processos só poder variar numa determinada gama de funcionamento, ou seja, apresentar saturação. Aquando do projecto do sistema de controlo é habitual considerar-se o efeito de saturação, procurando que a acção de controlo se mantenha dentro da gama de funcionamento em condições normais de funcionamento. No entanto, a ocorrência de uma falha pode ter como efeito a saturação da acção de controlo.

Assim, o sistema de FTC deve ser capaz de acomodar completamente a falha através de um reescalonamento do controlador ou aceitar uma degradação do desempenho pretendido para o sistema global. Muitas vezes, é necessário considerar um compromisso entre estas duas soluções, conduzindo a uma situação que se pode intitular de degradação harmoniosa do desempenho (*graceful performance degradation*) (Jiang and Zhang, 2002).

## 2.7 O Estado de Arte em Controlo Tolerante a Falhas

Nesta secção pretende-se apresentar um levantamento dos trabalhos existentes mais significativos para a área do controlo tolerante a falhas. Para as classes de métodos que se vão referir, inclui-se uma breve discussão sobre as suas vantagens, desvantagens e a sua relação com os métodos apresentados nesta dissertação.

Estando a área de FTC ainda em formação e crescimento, já se encontram livros que abordam temáticas que se enquadram nesta área. Destes destacam-se os livros de Patton *et al.* (1989), Gertler (1998), Chen and Patton (1999), Patton *et al.* (2000), Aström *et al.* (2001), Schroder (2002), Blanke *et al.* (2003), Simani *et al.* (2003), Hajiyevev and Caliskan (2003) e Isermann (2006).

Das muitas publicações em conferências e revistas, salientam-se os artigos que apresentam vários levantamentos do estado de arte em diagnóstico de falhas e FTC, como por exemplo, Stengel (1991), Rauch (1995), Blanke (1996), Huzmezan and Maciejowski (1997), Isermann (1997), Patton (1997a), Blanke *et al.* (1997), Leonhardt and Ayoubi (1997), Blanke *et al.* (2000), Mangoubi and Edelmayer (2000), Patton *et al.* (2000), Saberi *et al.* (2000), Blanke *et al.* (2001), Fenton *et al.* (2001), Staroswiecki and Gehin (2001), Liaw and Liang (2002), van Schrik (2002), Kleer and Kurien (2003), Zhang and Jiang (2003), Venkatasubramanian *et al.* (2003a, 2003b, 2003c) e Wu (2004).

### 2.7.1 Métodos Passivos em Controlo Tolerante a Falhas

Tal como foi referido nas secções anteriores, os métodos passivos em controlo tolerante a falhas procuram obter insensibilidade a determinadas falhas através da robustez do sistema em relação a essas falhas. Quando se aplicam a sistemas com falhas em componentes (modelo (2.8)), estes métodos assumem, usualmente, que as matrizes no espaço de estados do sistema dependem da falha  $f(t)$  de uma determinada forma, por exemplo, por afinidade (*affinely*) (Stoustrup *et al.*, 1997; Wu, 1997b) ou através de uma transformação fraccional linear (LFT) (Chen *et al.*, 1998a; Niemann and Stoustrup, 2002).

Para ultrapassar esta limitação, propõe-se, no Capítulo 3, um algoritmo que não impõe qualquer restrição sobre a forma como as matrizes do sistema dependem da falha, ou seja, o sinal  $f(t)$  intervém nas matrizes de uma forma genérica, assumindo unicamente que se mantêm limitadas.

Adicionalmente, os métodos passivos em FTC obtêm, muitas vezes, a tolerância a falhas representando determinadas falhas como incerteza no sistema, possibilitando a aplicação de abordagens de controlo robusto. No entanto, a estrutura da incerteza não é frequentemente considerada de forma a obter um problema de optimização convexa, usualmente em  $\mathcal{H}_\infty$  (Chen and Patton, 2001; Khosrowjerdi *et al.*, 2002; Niemann and Stoustrup, 2003). Para reduzir o aspecto conservativo das abordagens com incertezas não estruturadas, propõe-se, no Capítulo 3, uma abordagem que explicita de uma forma estruturada o efeito das falhas no sistema e usa o valor singular estruturado para encontrar uma solução para o problema de optimização associado à formulação do problema em  $\mathcal{H}_\infty$ .

De seguida apresenta-se um resumo de algumas das abordagens passivas em FTC.

### 2.7.1.1 Controlo Confiável

A abordagem de projecto de controladores passivos confiáveis (*reliable control*) têm como objectivo principal garantir a fiabilidade do sistema em malha fechada, assegurando a estabilidade e o desempenho pretendido na presença de falhas previstas. O objectivo traduz-se na procura de um controlador que optimize o denominado (usualmente no projecto de controladores LQR ou  $\mathcal{H}_\infty$ ) desempenho com a pior-falha (*worst-fault performance*) para todas as falhas previstas. Esta abordagem assume que uma avaria total só pode ocorrer num determinado subconjunto de sensores e actuadores do sistema. Como referência para métodos de projecto de controladores confiáveis, destacam-se os artigos de Cho and Bien (1989), Veillette (1992, 1995), Ge *et al.* (1996), Seo and Kim (1996), Suyama and Zhang (1997), Zhao and Jiang (1998), Yang *et al.* (1999), Chang (2000), Liang *et al.* (2000), Ferreira (2002), Hsieh (2002), Liao *et al.* (2002), Niemann and Stoustrup (2002) e Suyama (2002).

### 2.7.1.2 Controlo Robusto

O projecto de controladores robustos (*robust control*) baseia-se numa outra classe de abordagens passivas em que se pretende obter um controlador que satisfaça as especificações de projecto em condições normais de funcionamento do sistema e que garanta um desempenho satisfatório na presença de falhas.

Estas abordagens são usualmente baseadas na teoria por realimentação quantitativa – QFT (*Quantitative Feedback Theory*) (Keating *et al.*, 1997; Niksefat and Sepehri, 2002) ou na teoria do controlo robusto em  $\mathcal{H}_\infty$  (Wu, 1993; 1997b; Tyler and Morari, 1994; Hamada *et al.*, 1996; Murad *et al.*, 1996; Zhou *et al.*, 1996; Joshi, 1997; Stoustrup *et al.*, 1997; Chen *et al.*, 1998a; 1998b; Maghami *et al.*, 1998; Suzuki and Tomizuka, 1999; Zhou, 2000; Chen and Patton, 2001; Demetriou, 2001b; Stoustrup and Niemann, 2001; 2002; Zhou and Ren, 2001; Puig and Quevedo, 2001; Niemann and Stoustrup, 2003; Fliess *et al.*, 2004; 2005)

## 2.7.2 Métodos Activos em Controlo Tolerante a Falhas

Os métodos activos em FTC encontram-se com mais frequência na literatura do que os passivos, devido ao facto de apresentarem um maior desempenho e uma maior capacidade de tratar um conjunto mais abrangente de classes de falhas. Nas subsecções que se seguem, procura-se apresentar as referências bibliográficas mais significativas para cada tipo de método activo.

### 2.7.2.1 Método da Pseudo-Inversa

O método da Pseudo-Inversa – PIM (*pseudo-inverse method*) (Gao and Antsaklis, 1991) é um dos métodos activos mais citados na literatura em FTC, devido à sua simplicidade computacional e à sua habilidade para tratar uma abrangente classe de falhas no sistema. A versão básica do método considera um sistema linear nominal, dado por:

$$S^{nom} : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}, \quad (2.9)$$

com um controlador linear por realimentação dos estados,  $u(t) = -Kx(t)$ , assumindo que os estados do sistema são mensuráveis.

Para uma situação genérica de falha, o método considera a representação do sistema pós-falha:

$$S^f : \begin{cases} \dot{x}^f(t) = A_f x^f(t) + B_f u^R(t) \\ y^f(t) = C_f x^f(t) \end{cases}, \quad (2.10)$$

em que o novo controlador mantém a sua estrutura, ou seja  $u^R(t) = -K_R x^f(t)$ .

Assim, o objectivo do método consiste em procurar a nova matriz de realimentação dos estados,  $K_R$ , que minimize a distância entre as matrizes de estado em malha fechada  $A^c$  e  $A_f^c$ , ou seja,

$$\text{PIM} : \begin{cases} K_R = \arg \min_{K_R} \|A^c - A_f^c\|_K = \arg \min_{K_R} \|(A - BK) - (A_f - B_f K_R)\|_K, \\ = B_f^\dagger (A - BK - A_f) \end{cases}, \quad (2.11)$$

onde  $B_f^\dagger$  é a pseudo-inversa da matriz  $B_f$ .

As vantagens desta abordagem são que se adequa bastante à implementação *online* devido à sua simplicidade, e, talvez ainda mais importante, que permite alterações em todas as matrizes do sistema, em consequência das falhas. No entanto, apresenta uma grande desvantagem que resulta do facto da optimização definida pela equação (2.11) nem sempre estabilizar o sistema em malha fechada.

Para confirmar esta situação, podem-se considerar alguns exemplos simples como os que são referidos em Gao and Antsaklis (1991). Para ultrapassar este problema é proposto também em Gao and Antsaklis (1991) o método da pseudo-inversa modificada (*modified pseudo-inverse method*) que, basicamente, resolve o mesmo problema adicionando a condição de que o sistema em malha fechada resultante deve ser estável. Daqui resulta um problema de optimização com restrições, verificando-se uma sobrecarga do ponto de vista computacional.

Uma abordagem semelhante é proposta em Rauch (1994) e em Liu (1996), em que a nova acção de controlo  $u^R(t)$  é directamente calculada a partir do controlo nominal  $u(t)$  através de  $u^R(t) = B_f^\dagger u(t)$ .

Foram, ainda, propostas outras modificações a esta abordagem, das quais se destacam a consideração de falhas aditivas na equação de estado e a inclusão de um termo aditivo na equação do controlador para compensar essas falhas (Theilliol *et al.*, 1998; Noura *et al.*, 1999; 2000), da realimentação estática das saídas (Konstantopoulos and Antsaklis, 1995; 1999), e do emparelhamento das respostas em frequência do sistema em malha fechada na situação nominal e após a ocorrência da falha (Yang and Blanke, 2000a). Outra desvantagem desta abordagem deriva da utilização da realimentação dos estados do sistema, que nem sempre estão acessíveis, e do facto que, em geral, não é aplicável às falhas nos sensores nem quando se considera a existência de incerteza no modelo ou no sistema de FDD.

Em Kanev and Verhaegen (2000a) é proposta uma extensão deste método, possibilitando a consideração de falhas nos sensores e nos actuadores usando um conjunto de controladores LQG reconfiguráveis e reforçando a estabilidade do sistema em malha fechada através da formulação do problema de optimização usando desigualdades lineares com matrizes – LMI (*Linear Matrix Inequality*).

### 2.7.2.2 Atribuição da Estrutura Própria

O método de atribuição da estrutura própria – EsA (*eigenstructure assignment method*) (Seron *et al.*, 1996; Liu and Patton, 1998) é uma abordagem mais intuitiva do que o PIM dado que, na reconfiguração do controlador, procura emparelhar as estruturas próprias (constituídas pelos valores próprios e pelos vectores próprios) das matrizes  $A^c$  do sistema em malha fechada nominal e com falha. A ideia principal consiste em definir alguns dos valores próprios dominantes e, ao mesmo tempo, minimizar a norma quadrática da diferença entre os vectores próprios correspondentes. Esta metodologia tem sido desenvolvida quer com a realimentação dos estados (Zhang and Jiang, 1999a; 2000) quer com a realimentação das saídas do sistema (Konstantopoulos and Antsaklis, 1996a; 1996b; Belkharraz and Sobel, 2000). Especificando melhor para o caso da realimentação dos estados, se  $\lambda_i, i = 1, \dots, n_x$  forem os valores próprios da matriz  $A^c$  do sistema nominal em malha fechada, resultante da interligação do sistema dado por (2.9) com o controlador  $u(t) = -Kx(t)$ , e se  $v_i, i = 1, \dots, n_x$  forem os vectores próprios correspondentes, o método EsA determina os ganhos de realimentação dos estados,  $K_R$ , para o modelo com falhas dado por (2.10), como solução do problema formulado como (Zhang and Jiang, 1999a):

$$\text{EsA: } \begin{cases} \text{Procurar } K_R \\ \text{tal que } (A_f - B_f K_R)v_i^f = \lambda_i v_i^f, \lambda_i = 1, \dots, n_x, \\ \text{e } v_i^f = \arg \min_{v_i^f} \|v_i - v_i^f\|_{W_i}^2 \end{cases} \quad (2.12)$$

em que  $\|v_i - v_i^f\|_{W_i}^2 = (v_i - v_i^f)^T W_i (v_i - v_i^f)$  e  $W_i$  é uma matriz de ponderação de dimensões adequadas.

Deste modo, o controlador  $K_R$  deve fazer com que os pólos do sistema resultante em malha fechada coincidam com os pólos do sistema nominal e que os vectores próprios das matrizes de estado em malha fechada  $A^c$  e  $A_f^c$  sejam tão próximos quanto possível. Como os valores e os vectores próprios determinam a forma da resposta temporal do sistema, este método pode ser caracterizado pela tentativa de preservar a resposta desejada para o sistema em malha fechada, depois da ocorrência das falhas. Daqui e tendo em conta os objectivos gerais dum sistema de FTC, pode-se afirmar que o método EsA evidencia uma formulação mais natural do que o PIM, garantindo a estabilidade do sistema. Além disso, o esforço computacional do método não é muito significativo dado que a solução analítica para o problema formulado em (2.12) está disponível em Zhang and Jiang (1999a), não sendo, portanto, necessário efectuar qualquer optimização *online*. As principais desvantagens deste método residem no facto da incerteza no modelo ou no sistema de FDD não poder ser facilmente incorporada na sua formulação e no pressuposto de que os controladores são estáticos.

### 2.7.2.3 Múltiplos Modelos

O método de múltiplos modelos – MM (*Multiple Model method*) é uma abordagem activa em FTC que se pode englobar mais na classe de métodos baseados na projecção do que nos de reconfiguração *online*. Especificando, o método considera a existência de um conjunto finito de modelos lineares  $M_i, i=1, \dots, n_M$  que possibilitam a descrição do sistema nas diversas condições de operação, nominais ou com falha. Para cada um dos modelos locais (associados a cada modo de funcionamento),  $M_i$ , é projectado, *offline*, um controlador  $K_i$ . Esta abordagem consiste, essencialmente, na determinação, *online*, da acção de controlo a aplicar ao sistema que resulta de uma combinação ponderada das várias acções de controlo geradas pelos controladores (Athans *et al.*, 1977; Maybeck and Stevens, 1991; Griffin and Maybeck, 1997; Zhang and Jiang, 1999b; 2001; Demetriou, 2001a; Theilliol *et al.*, 2003; Yen and Ho, 2003).

Cada controlador usa normalmente um filtro de Kalman projectado para cada modelo local  $M_i$ .

Para cada modelo do sistema, determina-se a probabilidade desse modelo representar o sistema real,  $\mu_i \geq 0$ , que será subseqüentemente usada como ponderação no cálculo da acção de controlo efectiva:

$$u(t) = \sum_{i=1}^{n_M} \mu_i u_i(t), \quad \sum_{i=1}^{n_M} \mu_i = 1, \quad (2.13)$$

em que  $u_i(t)$  é a acção de controlo gerada pelo correspondente controlador  $K_i$ .

O método de modelos múltiplos, embora apresente características adequadas para a modelização e o projecto de controladores de sistemas não lineares, considera, usualmente, a existência de um número restrito de falhas previstas, sendo definido um modelo local para cada uma dessas falhas. Desta forma, é assumido que em cada instante de tempo, só um modelo,  $M_i$ , corresponde ao modo de funcionamento do sistema, obtendo-se, assim, uma ponderação  $\mu_i$  com um valor aproximadamente igual a 1, apresentando as restantes ponderações  $\mu_j, j \neq i$  um valor próximo de 0. Consequentemente, só o controlador correspondente ao modelo  $M_i$  estará efectivamente activo. Caso o modo de funcionamento do sistema não corresponda a um modelo predefinido, resultando, por exemplo, da ocorrência de falhas não previstas, a representação do sistema por uma determinada combinação convexa de modelos locais seria a solução ideal. Neste caso, a acção de controlo dada por (2.13) não será a óptima e poderá levar o sistema em malha fechada à instabilidade, o que se pode traduzir por uma desvantagem deste método. Uma possível abordagem para ultrapassar este problema seria a consideração de um conjunto de controladores preditivos e obter a acção de controlo efectiva por optimização, por exemplo, minimizando uma determinada função de custo.



#### 2.7.2.4 Comutação de Controladores

O método de comutação de controladores (*controller switching method*) abrange, praticamente, a classe dos métodos activos em FTC baseados na projecção. Apresentando algumas características semelhantes ao método de múltiplos modelos, considera um conjunto de modelos locais que representam o sistema para as situações de falha previstas. Para cada modelo é projectado um controlador que será seleccionado (por comutação entre os vários controladores) quando o modelo que lhe está associado for o que melhor se adequa ao actual comportamento dinâmico do sistema. A diferença deste método em relação ao de MM reside no facto de, neste caso, a acção de controlo efectiva não resultar de uma combinação das saídas dos vários controladores, mas da selecção da saída de um único controlador.

Para seleccionar o controlador adequado, considera-se, usualmente, um sinal residual, resultante da comparação entre a saída do sistema e as saídas dos vários modelos locais, que permite tomar a decisão sobre qual o modelo que melhor descreve o actual modo de funcionamento do sistema (Musgrave *et al.*, 1997; Boskovic and Mehra, 1998; Gopinathan *et al.*, 1998; Boskovic *et al.*, 1999; Lemos *et al.*, 1999). Mais recentemente, Yamé and Kinnaert (2003) propuseram uma abordagem em que a comutação se baseia na monitorização do desempenho do sistema em malha fechada. Em Ge and Lin (1996) e em Mahmoud *et al.* (2000a) é proposta uma forma integrada de projectar o conjunto de controladores, usando equações de Riccati acopladas e assumindo que as falhas e o sistema de FDD são representados por modelos de Markov de primeira ordem com determinadas matrizes de probabilidade de transição. Encontram-se outras abordagens na literatura que se baseiam na comutação dos controladores, das quais se destacam Morse (1996; 1997), Rato and Lemos (1999), Chang *et al.* (2001), Maki *et al.* (2001) e Médar *et al.* (2002a, 2000b). O problema de reduzir os transitórios durante a fase de comutação dos controladores também foi recentemente considerado em Kovács házy *et al.* (2001) e em Rato (2002). Em (Morse, 1995) é proposto o controlo usando a comutação baseada em lógica.

De referir que um dos inconvenientes das abordagens baseadas na comutação de controladores deriva do facto de, usualmente, só se considerar um número reduzido de falhas previstas. Todavia, apresenta como vantagem, a possibilidade de se projectarem controladores locais robustos em relação à incerteza em cada modelo.

#### 2.7.2.5 Sistemas Integrados de FDD e de FTC

Em diversos artigos, os projectos dos sistemas de FDD e de FTC não são considerados em separado, sendo englobados numa única formulação. Por exemplo, as abordagens de controlo de múltiplos modelos podem ser combinados, sem dificuldade, com esquemas de

FDD baseados, igualmente, em múltiplos modelos, obtendo-se, para citar um caso, o denominado estimador de múltiplos modelos interactivos – IMM (*Interacting Multiple Model*) (Zhang and Jiang, 1999b). A integração dos sistemas de FDD e de FTC são referidos, por exemplo, em Maybeck and Stevens (1991), Zhang and Jiang (1999a, 1999b, 2001), Sauter *et al.* (2002) e Jamouli *et al.* (2005).

Além desta abordagem, existem outras que combinam métodos de FDD baseados em MM com controladores distribuídos (Maybeck, 1999) ou com controladores PID (Zhou and Frank, 1998), outras que resultam da combinação de métodos adaptativos em FDD e em FTC (Boskovic and Mehra, 2003), ou ainda as que consideram a acomodação da falha através da adição de um sinal residual escalar, obtido pelo esquema de FDD, à acção de controlo nominal (Jakubek and Jorgl, 2000).

Refira-se, no entanto, que estes métodos integradores não consideram a incerteza do modelo e que resultam, muitas vezes, da interligação directa dos esquemas de FDD e de FTC, sem valorizar o facto da informação gerada pela parte de FDD poder apresentar imprecisões. Para ultrapassar esta situação, em Kanev and Verhaegen (2003a) é proposto um método que assegura robustez em relação à incerteza no modelo e no sistema de FDD.

### 2.7.2.6 Seguimento de Modelo

O método de seguimento de modelo é uma abordagem activa em FTC que considera, basicamente, um modelo de referência da forma:

$$\begin{cases} \dot{x}^M(t) = A_M x^M(t) + B_M \text{ref}(t) \\ y^M(t) = x^M(t) \end{cases}, \quad (2.14)$$

em que  $\text{ref}(t)$  é o sinal de referência.

O objectivo do método consiste em determinar as matrizes  $K_r$  e  $K_x$  tal que a interligação do sistema em malha aberta, dado por (2.9), com o controlador definido por  $u(t) = K_r \text{ref}(t) - K_x x(t)$ , corresponda ao modelo de referência (2.14). Para atingir esse objectivo, os modelos de referência e do sistema em malha fechada são formulados da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \dot{y}^M(t) &= A_M x^M(t) + B_M \text{ref}(t) \\ \dot{y}(t) &= (CA - CBK_x) x(t) + CBK_r \text{ref}(t) \end{aligned}, \quad (2.15)$$

obtendo-se o denominado seguimento de modelo perfeito – PMF (*Perfect Model Following*) através dos controladores dados por:

$$\begin{aligned} K_x &= -(CB)^{-1}(A_M - CA) \\ K_r &= (CB)^{-1}B_M \end{aligned}, \quad (2.16)$$

admitindo que o sistema tem um número de entradas igual ao número de saídas ( $\dim(y) = \dim(u)$ ) e que existe a inversa da matriz  $(CB)$ .

Quando as matrizes do sistema  $(A, B)$  em (2.9) não forem conhecidas de uma forma exacta, podem ser substituídas por matrizes estimadas  $(\hat{A}, \hat{B})$ , resultando no chamado método indirecto ou explícito (*indirect (explicit) method*) (Bodson and Groszkiewicz, 1997). No entanto, o método indirecto não garante a estabilidade do sistema em malha fechada e, adicionalmente, a matriz  $(C\hat{B})$  pode não ser invertível. Para evitar a necessidade de estimação das matrizes do sistema pode-se considerar o método directo (implícito) (*direct (implicit) method*) para estimar directamente as matrizes do controlador,  $K_r$  e  $K_x$ , usando um esquema adaptativo. Usualmente são consideradas duas abordagens para o método directo de seguimento de modelo, os métodos do erro da saída e da entrada (Morse and Ossman, 1990; Gao and Antsaklis, 1992; Bodson and Groszkiewicz, 1997; Boskovic *et al.*, 2000a; Zhang and Jiang, 2002). De notar que sendo este método directo de seguimento de modelo baseado num procedimento adaptativo, também poderá ser considerado no grupo de métodos de controlo adaptativo.

Mais recentemente, foram propostas algumas ideias semelhantes a esta metodologia que tratam falhas multiplicativas no actuador, considerando a realimentação dos estados (Tao *et al.*, 2000b; 2001; 2002b) ou a realimentação das saídas (Tao *et al.*, 2000a; 2002a; Fei *et al.*, 2003).

Os métodos de seguimento de modelo têm como vantagem o facto de, usualmente, não necessitarem de um esquema de FDD. No entanto, apresentam como inconvenientes, o facto de não se aplicarem a falhas em sensores e de não permitirem a consideração de incerteza no modelo.

### 2.7.2.7 Controlo Adaptativo

Os métodos de controlo adaptativo apresentam características adequadas ao FTC activo, devido, essencialmente, à sua capacidade de adaptação a alterações dos parâmetros do sistema, não necessitando, na maior parte dos casos, do mecanismo de reconfiguração e do sistema de FDD, indicados na Figura 2.9. Isto verifica-se essencialmente para as falhas nos componentes e nos actuadores. No entanto, no caso de algumas falhas nos sensores, se o método se basear na realimentação das saídas, as medidas efectuadas com falha irão seguir o sinal de referência podendo levar à instabilidade do sistema. Por exemplo, se a falha no sensor for total, o controlador adaptativo tenderá a conduzir a acção de controlo para que o sinal medido com falha seja igual ao valor especificado pela referência, o que não será possível devido à falha total do sensor. Nestes casos, será necessário incluir o sistema de FDD para detectar e diagnosticar a falha no sensor e o mecanismo de reconfiguração para reconfigurar adequadamente o controlador adaptativo.

A classe de métodos de controlo adaptativo inclui os métodos directos de seguimento de modelo e os métodos de múltiplos modelos, referidos anteriormente, e os métodos de controlo de parâmetros de variação linear – LPV (*linear parameter-varying*) usados no projecto de sistemas de FTC (Bennani *et al.*, 1999; Ganguli *et al.*, 2002; Shin *et al.*, 2002; Kanev and Verhaegen, 2003a). Outros métodos adaptativos para FTC, embora não tratem a incerteza do modelo, podem ser encontrados, por exemplo, em Ahmed-Zaid *et al.* (1991), Ikeda and Shin (1998), Boskovic *et al.* (2000b), Kim *et al.* (2001a), Qu *et al.* (2001), Siwakosit and Hess (2001), Dionísio *et al.* (2003), Jiang *et al.* (2003), Kececi *et al.* (2003a, 2003b) e Fekri *et al.* (2004).

### 2.7.2.8 Modelo de Controlo Preditivo

A abordagem por modelo de controlo preditivo – MPC (*Model Predictive Control*) é uma estratégia de controlo relevante em termos industriais que tem sido, recentemente, utilizada em FTC.

Dado que o método executa um procedimento de optimização em cada passo temporal é, usualmente, considerado em processos com uma dinâmica temporal mais lenta, tal como é o caso de muitos dos processos na indústria química (Kothare *et al.* 1996) ou em processos que usam energia solar (Gil *et al.*, 2003). A optimização consiste basicamente no emparelhamento, usando a norma quadrática, entre as trajectórias da saída preditiva do sistema e da referência, assumindo que esta última é conhecida antecipadamente. Um dos aspectos mais relevantes dos métodos MPC consiste na possibilidade das restrições sobre as entradas, as saídas e os estados do sistema, poderem ser incorporadas na formulação do problema de optimização.

Para que a arquitectura de MPC possa incluir a tolerância a falhas, em Aström *et al.* (2001) é proposto: i) a redefinição das restrições para representarem determinadas falhas, ii) a alteração do modelo interno e iii) a alteração dos objectivos de controlo para que reflectam as limitações resultantes do aparecimento de modos de funcionamento com falhas. Dado que, deste modo, o diagnóstico das falhas não necessita de operações de optimização adicionais, pode-se dizer que este método apresenta uma característica inerente de acomodação das falhas. Todavia, se o método de MPC é usado com a realimentação dos estados observados, o sistema observador deverá ser reconfigurado apropriadamente para que a estimação dos estados também seja efectuada com tolerância às falhas. Como referências para os sistemas de FTC baseados no MPC refiram-se os trabalhos de Huzmezan and Maciejowski (1998a, 1998b, 1998c, 1999), Kerrigan and Maciejowski (1999), Maciejowski and Jones (2003) e as referências neles incluídas.

Embora, como foi referido acima, as abordagens baseadas no MPC apresentem características adequadas ao FTC, a maior parte das que se baseiam no espaço de estados, assumem que os estados do sistema são mensuráveis.

Nestes casos, a incerteza do modelo pode ser facilmente considerada pelos algoritmos (Kothare *et al.*, 1996). Quando os estados não são todos medidos e não é considerada a incerteza no modelo, pode-se considerar um observador que possibilite obter a informação sobre os estados não medidos. No entanto, no caso do modelo com incerteza, o princípio da separação deixa de ser válido e, conseqüentemente, o observador e o controlador de MPC por realimentação das variáveis de estado deixam de poder ser projectados separadamente. Em Kanev and Verhaegen (2003b) é proposta uma abordagem que integra o projecto de um filtro de Kalman e um MPC de horizonte finito no mesmo procedimento de optimização, tornando possível a inclusão da incerteza do modelo no problema. Neste caso, o aumento da complexidade computacional poderá ser um inconveniente significativo.

### 2.7.2.9 Análise do FTCS

A análise (e a correspondente síntese) de sistemas de controlo tolerante a falhas (FTCS) tem sido considerada em vários trabalhos recentes. A estabilidade destes sistemas tem sido estudada, por exemplo, num contexto estocástico (Ge and Frank, 1995; Mahmoud *et al.*, 1999; 2000b; 2000c; 2001; 2002; 2003), considerando que o sistema é representado, em tempo contínuo, por:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(\eta(t))u(x(t), \Psi(t), t) \\ u(x(t), \Psi(t), t) &= -K(\Psi(t))x(t) \end{aligned} \quad (2.17)$$

em que  $\eta(t)$  representa as falhas no actuador e  $\Psi(t)$  o sistema de FDD.

Neste método de análise é assumido que  $\eta(t)$  e  $\Psi(t)$  são representados por processos de Markov com espaços de estado finitos  $S_\eta = \{1, 2, \dots, s_\eta\}$  e  $S_\Psi = \{1, 2, \dots, s_\Psi\}$ , respectivamente. Desta forma, só um conjunto finito de falhas previstas no actuador podem ser consideradas. Além disso, é assumido que as probabilidades de transição dos dois processos de Markov são conhecidas, o que é bastante difícil de obter em termos práticos (Mahamoud *et al.*, 2003). Para estes sistemas, a análise estocástica da estabilidade é efectuada com a presença de ruído, incertezas e de saturação na acção de controlo, usando equações de Riccati com matrizes acopladas. Os modelos de Markov são igualmente usados na análise da fiabilidade de FTCS, por exemplo, em Wu (2001a, 2001b) e em Wu and Patton (2003). A propriedade de reconfigurabilidade de um sistema também tem sido analisada usando medidas do nível de redundância do sistema (Wu *et al.*, 2000b; 2000c; Staroswiecki, 2002; Frei *et al.*, 1999).

Ainda no âmbito dos métodos de análise de sistemas de FTC, referem-se os trabalhos de Frei *et al.* (1999), Gehin and Staroswiecki (1999), Staroswiecki *et al.* (1999), Izadi-Zamanabadi and Staroswiecki (2000), Yang and Hicks (2002), Bonivento *et al.* (2003b) e Shin and Belcarsto (2003).

### 2.7.2.10 Reconfiguração/optimização *online*

As abordagens de FTC que se baseiam na reconfiguração e na optimização *online* consideram, usualmente, algoritmos com um peso computacional significativo. Por exemplo, o método de controlo redistribuído baseia-se numa estratégia de optimização *online* (Buffington *et al.*, 1999; Burken *et al.*, 1999; Eberhardt and Ward, 1999; Maybeck, 1999), que é muito utilizado no controlo de aviões com tolerância, essencialmente, a falhas nos actuadores, onde a redundância de hardware também está, normalmente, presente. Este método, após a ocorrência de uma falha num actuator, procura redistribuir a acção de controlo pelos restantes actuadores, usando um algoritmo de optimização *online*.

Outros métodos de FTC baseados na optimização/reconfiguração *online* são referenciados em Looze *et al.* (1985), Dardinier-Marion *et al.* (1999), Wu *et al.* (2000a), Yang and Stoustrup (2000), Yang and Blanke (2000b), Ho and Yen (2001), Tortora *et al.* (2002), Zhang *et al.* (2002), Kanev and Verhaegen (2000b, 2002), Charbonnaud *et al.* (2003), Marcos *et al.* (2003) e Verhaegen and Kanev (2005). De referir que alguns métodos que foram classificados como métodos de MPC também podem ser incluídos nesta classe de métodos de optimização/reconfiguração *online*. Recentemente, em (Mhaskar *et al.*, 2006), é proposto o projecto de sistemas de controlo tolerante a falhas de processos não lineares com características robustas e em que a reconfiguração se baseia no desempenho dos controladores candidatos.

### 2.7.2.11 Estimação dos estados/saídas tolerante a falhas

Nas abordagens de FTC em que o controlador depende da estimação dos estados do sistema efectuada por um observador é necessário garantir que a própria operação de estimação dos estados também é tolerante a falhas. Isto porque as falhas nos sensores, nos actuadores ou nos componentes podem resultar numa estimação incorrecta dos estados do sistema (realimentados para o controlador) e, deste modo, provocar a degradação do desempenho ou, mesmo, a instabilidade do sistema em malha fechada. Por exemplo, em Theilliol *et al.* (2001) considera-se a reconstrução dos estados do sistema após a ocorrência de falhas nos sensores. Em Akhenak *et al.* (2003) propõe-se a estimação do estado dum sistema não linear através de múltiplos observadores, sendo os parâmetros dos observadores obtidos através da resolução de um conjunto de desigualdades de matrizes lineares (LMI). Em Join *et al.* (2005) é proposto um método de estimação das falhas baseado no cálculo da derivada dos sinais associados às variáveis medidas do processo. Para controladores que se baseiam na realimentação das saídas, o método de mascarar as falhas nos sensores (Wu *et al.*, 2003) é um exemplo de uma técnica que poderá ser usada

para aumentar a tolerância a falhas na medição das saídas do sistema, através da substituição das medições com falha por valores estimados. Uma abordagem semelhante foi considerada em Ponsart *et al.* (2001).

### 2.7.2.12 Neuro-Difusos

Na área de computação adaptativa também têm sido propostas metodologias de FTC, nomeadamente usando redes neuronais, lógica difusa ou formulações neuro-difusas. Uma vantagem destes métodos deriva da sua aplicabilidade a sistemas não lineares usando a representação por modelos baseados em redes neuronais (Ribeiro, 2001) ou em lógica difusa (Diao and Passino, 2001; 2002; Ichtev *et al.*, 2002). A capacidade de aprendizagem destes métodos torna possível a adaptação do modelo e do controlador em situações de falha no sistema, obtendo-se, assim, a desejada tolerância a falhas. Diversas abordagens de FTC usam métodos neuro-difusos que procuram tirar partido da combinação entre as formulações baseadas em redes neuronais e em lógica difusa (Yen, 1994; Wu, 1997a; Ballé *et al.*, 1998; Schram *et al.*, 1998; Lopez-Toribio *et al.*, 1999; Marcu *et al.*, 1999; Wise *et al.*, 1999; Yen and Ho, 2000; Chen and Narendra, 2001; Chen and Lee, 2002; Diao and Passino, 2001; 2002; Zhang *et al.*, 2002; Fray *et al.*, 2003). Em Nyberg and Krysander (2003) propõe-se uma formulação de diagnóstico de falhas baseada na combinação de metodologias de Inteligência Artificial, de técnicas de FDI e de testes usando hipóteses estatísticas. De referir também a utilização de princípios da imunologia para a detecção de falhas (Branco *et al.*, 2003).

### 2.7.2.13 Orientados para a Aplicação

No âmbito do controlo tolerante a falhas, encontram-se muitos artigos com propostas de abordagens tolerantes a falhas direccionadas para aplicações específicas. Como exemplos, refiram-se os trabalhos de Visinski *et al.* (1995), Mohamed *et al.* (1997), Battaini and Dyke (1998), Blanke *et al.* (1998), Askari *et al.* (1999), Li *et al.* (1999), Schdeier and Frank (1999), Jonckheere and Lohsoonthorn (2000), Liu *et al.* (2000), Bonivento *et al.* (2001a, 2001b, 2003a), Ho and Yen (2001), Kim *et al.* (2001b), Puig and Quevedo (2001), Podder and Surkar (2001), Somov *et al.* (2002) e Gaspar *et al.* (2003). Outras referências podem ser consultadas em Aström *et al.* (2001) e em Zhang and Jiang (2003).

### 2.7.3 Casos de estudo

Para a realização de testes e para a comparação do desempenho entre as várias abordagens em FTC, foram propostos alguns processos e modelos de simulação de referência (*benchmarks*). Destes destacam-se o gerador de vapor (Ordys, 1994; Boumaman and Dauphin-Tanguy, 1996); o actuador de um motor diesel (Blanke *et al.*, 1995), o sistema de propulsão de um navio (Izadi-Zamanabadi and Blanke, 1998; 1999; capítulo 13 de Aström *et al.*, 2001), o processo laboratorial dos três tanques, (Heiming and Lunze, 1999; capítulo 12 de Aström *et al.*, 2001), o posicionamento de um satélite (Bogh *et al.*, 1995; Bogh, 1997; capítulo 17 de Aström *et al.*, 2001), estes dois definidos no âmbito do projecto COSY (*Control of Complex Systems*), um processo químico de neutralização (Lunze and Schroder, 1999a; 1999b; Schroder, 2002; secção 10.2 de Blanke *et al.*, 2003) e o actuador de um processo de produção de açúcar (Patton *et al.*, 2000), estabelecido no projecto DAMADICS (*Development and Application of Methods for Actuator Diagnosis in Industrial Control Systems*).

Dos muitos trabalhos existentes sobre a aplicação de técnicas de diagnóstico de falhas e de controlo com tolerância a falhas a sistemas dinâmicos, indicam-se algumas referências na área da aviação (Morse, 1990; Patton, 1991; Musgrave *et al.*, 1997; Somov *et al.*, 2002; Marcos and Balas, 2005), em sistemas de propulsão de navios (*Ship propulsion plant*) (Blanke *et al.*, 1998; Blanke, 2001; Bonivento *et al.* 2001b; 2003a), em satélites (Bogh and Blanke, 1997), em motores (Bonett, 1999; Grimmelius *et al.*, 1999), em comboios (Kim, 2001b), em bombas motorizadas (Dalton *et al.*, 1996; Higham and Perovic, 2001), em turbinas geradoras de vapor (Still and Zörner, 1996), em maquinaria (Bonivento *et al.*, 2001a; Ericsson *et al.*, 2005), em sistemas incorporados em automóveis (Kiencke, 1997; Gaspar *et al.*, 2003; Börner and Isermann, 2004; Ding *et al.*, 2005), em processos químicos (Russell *et al.*, 2000; Fuente and Derán, 2001), em veículos autónomos (Podder and Surkar, 2001), em robótica (Visinski *et al.*, 1995), na indústria (Mohamed *et al.*, 1997; Rodrigues, 2006), em estruturas de engenharia civil (Battaini and Dyke, 1998) e em sistemas clínicos (Mendonça *et al.*, 2002).

## 2.8 Enquadramento da Abordagem Proposta

A metodologia proposta procura ser modular, estruturada por camadas e robusta, contemplando os seguintes aspectos fundamentais:

- i) Obtenção de um modelo analítico ou experimental que represente o comportamento dinâmico do processo. No caso da identificação do modelo experimental considera-se uma abordagem baseada em redes neuronais com uma



topologia recorrente de Elman. A partir do modelo não-linear do processo pretende-se obter o modelo linear com incerteza que representa o processo em cada modo de funcionamento. Efectuando uma análise da estrutura do processo determina-se a redundância existente que permitirá definir mecanismos de reconfiguração no caso de ocorrência de uma falha grave ou avaria num determinado componente do processo.

- ii) Projecto e implementação do sistema de diagnóstico de falhas usando toda a informação existente sobre o processo que permita detectar, isolar e identificar as falhas que ocorram em sensores, em actuadores ou no próprio processo. Como resultado do diagnóstico deve ser gerada informação sob a forma de resíduos que sejam representativos das falhas detectadas.
- iii) Projecto e implementação de um sistema de supervisão usando, essencialmente, técnicas baseadas em lógica difusa, que determine e estabeleça, preferencialmente, de uma forma automática, a melhor configuração para o sistema de controlo que garanta que os objectivos definidos para o funcionamento do processo sejam atingidos, mesmo quando ocorrerem falhas. O sistema de supervisão deverá ter a capacidade de acomodar as falhas e de reconfigurar o sistema no caso de falhas graves ou avarias. Caso seja necessário, deverá redefinir os objectivos (por exemplo, degradando o desempenho pretendido) tendo em consideração o contexto resultante da ocorrência das falhas. Este sistema deverá também, gerar informação a fornecer ao supervisor humano sobre o modo de funcionamento do processo, identificando com alarmes a ocorrência de falhas, e recolher a informação introduzida pelo supervisor humano, por exemplo os valores de referência pretendidos para o sistema. Numa situação de incapacidade de controlo do processo, o sistema de supervisão deverá ser capaz de estabelecer os procedimentos necessários para efectuar a paragem do processo de uma forma segura.
- iv) Projecto e implementação de um sistema executor de acções correctivas enviados pelo supervisor. Essencialmente, será um módulo onde se efectuará a fusão da informação sensorial usando sensores virtuais para substituir um sensor avariado ou se configurará um actuador virtual para fazer face à indisponibilidade de um componente de actuação.
- v) Projecto e implementação de um sistema de controlo robusto e tolerante a falhas que apresente uma capacidade de resposta adequada aos vários modos de funcionamento do processo, incluindo os modos resultantes da ocorrência de falhas.

O projecto dos controladores é baseado, essencialmente, em técnicas de controlo robusto, considerando que para cada ponto de funcionamento existe um modelo linear do processo e que as diferenças entre o modelo e o processo são representadas por incerteza.

Considerando que o processo é controlado por um dos controladores predefinidos que o supervisor escolhe, pretende-se que o sistema em malha fechada seja tolerante a falhas. Estas podem ocorrer nos elementos de medida (sensores), nos elementos de actuação (actuadores), ou num componente do próprio processo. As falhas podem ser de maior ou menor amplitude e os seus efeitos podem apresentar diferentes níveis de gravidade, dependendo da localização da falha e do efeito que provocar em todo o processo.

Deste modo, para as falhas de menor gravidade, propõe-se uma solução em que o sistema de controlo é projectado de forma a garantir que o sistema global se mantém em malha fechada com um desempenho de acordo com o previsto. Neste caso, assume-se que a acomodação das falhas é obtida por compensação das falhas identificadas sem ser necessário alterar a estrutura do sistema. A partir do momento em que o módulo de diagnóstico de falhas identifique uma falha, o supervisor deverá fazer a sua classificação em termos de severidade dos seus efeitos e, caso seja de baixa gravidade, deverá seleccionar o controlador adequado para essa situação e efectivar os elementos necessários à compensação dessa falha.

Por outro lado, se as falhas diagnosticadas forem classificadas como graves, o supervisor deverá tomar decisões que procurem, quer impedir a propagação do efeito da falha, quer a acomodação da falha, procedendo, caso isso seja possível e necessário, à reconfiguração do sistema, retirando do funcionamento normal o componente onde foi detectada a falha e efectivando a sua substituição por elementos redundantes reais ou virtuais.

### **2.8.1 Falha Grave num Sensor**

No caso da ocorrência de uma falha grave num sensor, a sua acomodação poderá ser obtida à custa de sensores virtuais que aproveitam a existência de redundância analítica para efectuar a fusão da informação dos restantes sensores operacionais. Para a reconstrução da informação do sensor em falha, poder-se-á considerar a estimação do valor da variável medida a partir de observadores previamente definidos. Caso esta reconstrução seja viável, não haverá necessidade de alterar o controlador nominal seleccionado. Caso isso não seja possível, o sistema poderá continuar em funcionamento se o sistema global for controlável sem a informação fornecida pelo sensor em falha.

No limite, o supervisor poderá ter que desencadear um procedimento de paragem do funcionamento do processo de uma forma segura para o próprio processo e para a sua vizinhança (o supervisor humano, os processos adjacentes, o ambiente ...).

## 2.8.2 Falha Grave num Actuador ou num Componente do Processo

Nas situações em que é diagnosticada a ocorrência de uma falha grave num actuador ou num componente do processo, o supervisor poderá ter que efectivar uma reconfiguração estrutural do processo, desactivando o subsistema que depende do actuador ou do componente em falha e activando elementos ou componentes redundantes que estejam em condições de entrar em funcionamento e que possibilitem que o processo satisfaça os objectivos de uma forma alternativa. Esta reconfiguração deve ser feita, preferencialmente, através de controladores virtuais que não implicam a comutação do controlador activo e redistribuem a acção de controlo do actuador com falha pelos restantes elementos operacionais. Embora o supervisor humano deva ser informado da reconfiguração a efectivar, pretende-se que todo o procedimento seja efectuado de uma forma automática.

## 2.8.3 Tarefas Principais do Supervisor

Do exposto atrás, resulta que o sistema de supervisão recebe informação do nível superior, através do supervisor humano (objectivos para o processo que se traduzem, essencialmente, na definição de referências) e informação do módulo de diagnóstico de falhas (resíduos que permitem detectar, isolar e identificar as falhas). A partir desta informação, o supervisor deve realizar de uma forma automática um conjunto de tarefas (ou serviços) que a seguir se enumeram:

- i) identificar o modo de funcionamento nominal do processo;
- ii) identificar o modo de funcionamento com falha, caracterizando e localizando, espacialmente e temporalmente, a falha;
- iii) seleccionar para cada modo de funcionamento nominal, o controlador adequado à satisfação dos objectivos definidos;
- iv) executar os procedimentos de acomodação de falha sem gravidade, efectuando as necessárias operações de compensação;
- v) executar os procedimentos de tolerância a falha com gravidade, realizando as respectivas operações de reconfiguração;
- vi) alterar os objectivos definidos para o processo, sempre que a situação resultante da ocorrência de uma falha seja impeditiva de se atingir os objectivos iniciais;
- vii) informar o supervisor humano sobre o modo de funcionamento do processo, a ocorrência de falhas e a sua caracterização, principalmente em termos de gravidade, e sobre as tomadas de decisão do supervisor relativamente à acomodação de falhas (acomodação, reconfiguração do processo e/ou do controlador e alteração dos objectivos definidos);
- viii) receber informação do supervisor humano relativamente aos objectivos pretendidos para o processo.

## 2.9 Conclusão

Neste capítulo fez-se, essencialmente, um levantamento do estado de arte na área de diagnóstico de falhas e de controlo com tolerância passiva e activa a falhas e enquadrou-se a abordagem proposta para o sistema de supervisão e controlo nos trabalhos existentes.

Inicialmente refere-se a importância crescente da área de diagnóstico e de tolerância a falhas na investigação e nas aplicações. Em seguida apresentaram-se as características fundamentais do sistema de supervisão, como elemento responsável pelas iniciativas necessárias à garantia do funcionamento do sistema em malha fechada de acordo com os objectivos delineados, nomeadamente, com tolerância a falhas. Não existindo uma terminologia normalizada para os termos usuais desta área na língua portuguesa, propôs-se uma versão, cuja listagem completa é apresentada no Apêndice A.

Sendo um trabalho relacionado com falhas, procedeu-se à sua classificação e apresentaram-se formas de as modelizar. Para uma melhor compreensão da arquitectura proposta para o sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas, descreveram-se os principais componentes do sistema de supervisão e controlo com tolerância a falhas.

Na parte final do capítulo apresentou-se um levantamento do estado de arte em controlo com tolerância passiva e activa de falhas e fez-se o correspondente enquadramento da abordagem proposta.

Esta abordagem contempla, numa primeira fase, o projecto integrado de controladores robustos com tolerância passiva a falhas e de um módulo de diagnóstico para a geração de resíduos que permitam a identificação de falhas. A metodologia proposta baseia-se no modelo linear com incerteza do processo e nas técnicas de análise e síntese de controlo robusto. O seu desenvolvimento é descrito no capítulo 3.

Numa segunda fase, propõe-se um sistema de supervisão e controlo com tolerância activa a falhas, baseado numa arquitectura com uma estrutura que inclui, como elementos principais, o supervisor, o sistema de controlo e o módulo de reconfiguração. Considera-se que o sistema de controlo é constituído por um conjunto de controladores projectados para os vários modos de funcionamento do processo. As tarefas principais do supervisor são a selecção do controlador adequado e a geração de acções correctivas que permitam a acomodação das falhas através do módulo de reconfiguração. Este módulo considera, basicamente, sensores virtuais para a estimação de saídas com falha e actuadores virtuais para a redistribuição da acção de controlo que era exercida pelo actuator com falha. No capítulo 4, descreve-se esta abordagem.

Para avaliar o desempenho e a tolerância a falhas das metodologias propostas, apresentam-se no capítulo 5 alguns resultados da sua aplicação nos processos considerados neste trabalho (“Pêndulo Invertido”, Campo de Colectores Solares e “Três Tanques”).

### 3. Diagnóstico e Tolerância Passiva a Falhas

Neste capítulo propõe-se uma metodologia de projecto integrado do controlador com tolerância passiva a falhas e do módulo de diagnóstico em sistemas dinâmicos. Enquadrado num sistema global de supervisão e controlo tolerante a falhas, o diagnóstico deve possibilitar a detecção, o isolamento e a identificação das falhas que agem sobre um processo dinâmico de variáveis contínuas no tempo.

Após uma introdução ao problema de diagnóstico e de controlo com tolerância passiva a falhas na secção 3.1, introduz-se, na secção 3.2, a modelização de sistemas dinâmicos, usando quando necessário a identificação do modelo não-linear sob a perspectiva de um problema de regressão não-linear, usando redes neuronais. Para tal é proposta a utilização de uma rede neuronal com topologia recorrente de Elman.

Na secção 3.3 apresenta-se a representação considerada para o processo usando modelos lineares com incertezas. Descrevem-se as incertezas não estruturadas e estruturadas. Na secção 3.4 formula-se o problema de controlo com tolerância passiva a falhas e derivam-se as condições de estabilidade e de desempenho nominais e robustas. A secção 3.5 descreve a estrutura do sistema de controlo e de diagnóstico de falhas.

A secção 3.6 contempla o projecto do controlador generalizado usando o algoritmo de síntese  $\mu$  com iterações *D-K*. A finalizar, referem-se as principais conclusões na secção 3.7.

### 3.1 Introdução

A função de um sistema de diagnóstico de falhas em sistemas dinâmicos é detectar, isolar e identificar as falhas. Para isso, estes sistemas são projectados para gerarem resíduos representativos das falhas previstas para o sistema (Frank *et al.*, 2000b).

A abordagem proposta para o diagnóstico de falhas baseia-se no modelo do sistema dinâmico e na formulação de controlo robusto. Para descrever o processo, o modelo não-linear poderá ser obtido a partir das leis que o regem ou aplicando uma metodologia de identificação. Neste caso, propõe-se a utilização de redes neuronais com uma arquitectura recorrente de Elman. A representação do processo é feita considerando um ou mais modelos lineares com incertezas, resultantes da linearização do modelo não-linear em torno dos pontos de funcionamento nominais.

A metodologia de projecto proposta considera uma extensão da formulação do problema de controlo robusto, integrando na mesma formulação os objectivos de controlo e de diagnóstico de falhas. A formulação desses objectivos é feita no domínio da frequência em  $H_\infty$ , aplicando-se as metodologias de análise e de síntese  $\mu$ . O controlador daí resultante apresenta características de estabilidade e de desempenho robustas em relação às incertezas no modelo e tolerância passiva às falhas consideradas. Os resíduos gerados pelo módulo de diagnóstico identificam as falhas, podendo ser usadas para monitorização ou supervisão.

### 3.2 Modelização do Sistema Dinâmico

Para o projecto de controladores e sistemas de diagnóstico de falhas baseado em modelos, têm sido desenvolvidas metodologias em que o modelo é definido em vários domínios, desde a área de Inteligência Artificial, onde a lógica é frequentemente utilizada (Hamscher *et al.*, 1992), aos Sistemas Dinâmicos de Eventos Discretos, para os quais se utilizam habitualmente os autómatos (Larsson, 1999; Sampath *et al.*, 1995;1996).

Um processo dinâmico de variáveis contínuas no tempo pode ser representado por um modelo analítico constituído por um conjunto de equações diferenciais. Estas equações resultam da aplicação de leis da física, química, termodinâmica, hidráulica, etc., que regem o comportamento dinâmico do processo. Um processo, em termos gerais, pode ser representado pela Figura 3.1, em que as variáveis externas indicadas intervêm nas equações que o caracterizam.

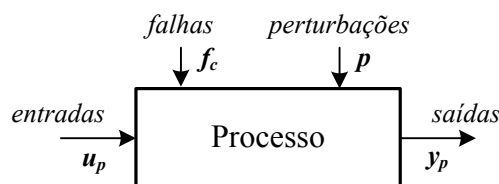


Figura 3.1: Representação de um processo dinâmico.

Assume-se que as variáveis de controlo,  $u_p(t)$  são conhecidas e manipuláveis, enquanto as variáveis de perturbação,  $p(t)$  não são manipuláveis e, muitas vezes, não mensuráveis. As falhas em componentes do processo,  $f_c(t)$  embora possam, em alguns casos, ter um efeito semelhante ao das perturbações, são consideradas como variáveis desconhecidas que, de alguma forma, alteram a evolução de uma determinada variável e, assim, o comportamento dinâmico do processo, identificado pelas variáveis de saída  $y_p(t)$ .

Nos casos em que o processo apresenta dimensão e/ou complexidade significativas, a obtenção do modelo analítico poderá representar uma tarefa de difícil concretização. Para lidar com estas situações, propõe-se a utilização de um método de identificação baseado em redes neuronais. Das várias arquitecturas possíveis considerou-se a arquitectura recorrente do tipo Elman.

### 3.2.1 Abordagens de Modelização

Com a modelização de sistemas dinâmicos, pretende-se obter uma representação que caracterize, em termos quantitativos e/ou qualitativos, os aspectos estáticos e dinâmicos mais significativos do sistema.

Uma possibilidade corresponde à obtenção de um modelo analítico que resulta da aplicação das leis fundamentais (da física, química, termodinâmica, hidráulica, etc.) que regem o comportamento dinâmico do sistema. O modelo é constituído, habitualmente, por um conjunto de equações diferenciais que expressam os balanços mássicos, de conservação de energia ou de quantidade de movimento, ou outros. Nesta representação, as variáveis presentes possuem uma interpretação física e as constantes envolvidas apresentam um valor predeterminado, dependente das propriedades do processo.

Apesar destes modelos poderem ser, de facto, bastante pormenorizados, também apresentam algumas desvantagens (Favoreel, 1999):

- i) São na generalidade complexos, devido a não-linearidades ou à sua ordem elevada, o que pode constituir um entrave ao projecto de controladores;
- ii) Requerem um conhecimento pormenorizado do sistema dinâmico, o que nem sempre acontece, sendo, por vezes, impossível obter uma descrição analítica dos fenómenos físicos em questão;
- iii) O processo de síntese de modelos analíticos é, normalmente, algo moroso e com custos de desenvolvimento elevados.

Uma via alternativa baseia-se directamente na experimentação. Para este efeito, é obtida a resposta do sistema aos sinais de excitação apropriadamente definidos, tendo em vista a recolha de informação a usar no processo de cálculo dos parâmetros da estrutura adoptada, mediante um procedimento de regressão. Este método de modelização assume a designação de identificação (Zadeh, 1962), pelo facto desta abordagem não se basear nas leis que regem o comportamento do sistema.

Em virtude da sua simplicidade metodológica, a identificação de sistemas dinâmicos, também conhecida por modelização experimental, tem vindo a ser cada vez mais adoptada em vários domínios, em particular no campo da engenharia, onde se inclui o controlo de processos e o diagnóstico de falhas. O desenvolvimento desta área remonta à década de 1960, tendo o trabalho de R. Kalman no âmbito do Controlo Óptimo (e.g. Kalman, 1964) dado um impulso decisivo neste sentido. Em Ljung (1996) e Eykhoff (1987) o desenvolvimento desta área científica é apresentado sob uma perspectiva cronológica e histórica.

### 3.2.2 Formulação do Problema de Identificação

Para efectuar a identificação de um sistema selecciona-se previamente uma estrutura parametrizável, sendo os dados de operação utilizados na determinação dos respectivos parâmetros, através da minimização de um determinado critério de desempenho.

O paradigma da identificação de sistemas dinâmicos envolve cinco etapas fundamentais:

- i) Especificação dos ensaios a realizar;
- ii) Recolha de dados de operação;
- iii) Selecção da estrutura do modelo;
- iv) Estimação de parâmetros;
- v) Validação do modelo.

Na fase de especificação dos ensaios, seleccionam-se os sinais a utilizar na excitação do sistema e os sinais a adquirir. Esta selecção deverá ter em conta a capacidade de generalização pretendida para o modelo. Sendo a recolha de dados efectuada num sistema computadorizado de aquisição de dados, é necessário especificar o período de amostragem. Após a realização dos ensaios de modo a obter um conjunto de dados entrada/saída, efectua-se a escolha de uma estrutura paramétrica adequada à descrição do comportamento dinâmico do sistema. Como exemplos de estruturas de modelos refiram-se os modelos ARX ou ARMAX para os casos lineares e os modelos NARX no contexto não-linear.

Na etapa seguinte, a estimação de parâmetros é concretizada através da minimização de um funcional que traduz um dado critério de desempenho. A última etapa consiste na validação do modelo obtido através da realização de testes, como sejam a análise de resíduos e a validação cruzada (discussão exaustiva em Ljung, 1999 e Johansson, 1993).

Para formalizar o problema de identificação, considere-se um sistema dinâmico SISO, sem perda de generalidade, no qual foram realizadas amostragens, durante um intervalo de tempo finito (sendo  $k = 0, \dots, N-1$  a variável temporal discreta), obtendo-se uma sucessão de entradas  $u(k)$  e uma sucessão de saídas  $y(k)$  dadas por:

$$U^N = [u(0), u(1), \dots, u(N-1)] \quad Y^N = [y(0), y(1), \dots, y(N-1)] \quad (3.1)$$



Basicamente, o problema de identificação consiste na procura de relações matemáticas entre um subespaço constituído por entradas e saídas passadas ( $U^N, Y^N$ ) e um subespaço de saídas futuras, representadas, genericamente, pela seguinte expressão em tempo discreto (Sjöberg *et al.*, 1995):

$$y(k) = g(U^{k-1}, Y^{k-1}) + v(k) \quad (3.2)$$

onde o termo aditivo  $v(k)$  advém do facto da saída no instante seguinte poder não ser uma função exacta das entradas e saídas passadas.

Quando este termo apresenta um valor pouco expressivo, a saída do modelo produz uma boa aproximação do valor exibido pelo sistema real.

Definindo uma dada família de funções  $\mathcal{G}$  à qual a função  $g(\cdot)$  pertence, a expressão (3.2) pode ser reescrita sob a seguinte forma parametrizável, onde  $\theta$  de dimensão  $n_p$ , representa o vector de parametrização:

$$\mathcal{G} = \left\{ g(U^{N-1}, Y^{N-1}, \theta) \mid \theta \in \mathcal{R}^{n_p} \right\} \quad (3.3)$$

A partir da estrutura de modelos seleccionada e da recolha de um conjunto adequado de dados de operação, obtém-se uma parametrização particular  $\hat{\theta}$ , por minimização de uma dada norma  $\mathcal{J}(\theta)$ .

Dado que na estrutura de modelos definida em (3.3), a dimensão do vector de parametrização está fortemente indexada ao número total de amostras recolhidas, será aconselhável proceder, à partida, à escolha da sua dimensão de forma criteriosa. Uma forma de responder a esta questão, consiste na formulação de  $\mathcal{G}$  como resultado da concatenação de duas aplicações: uma correspondente à transformação do espaço das observações num vector de dimensão finita  $\varphi(k) \triangleq \varphi(U^{k-1}, Y^{k-1})$ , denominado vector de regressão, e outra que projecta este vector no espaço de saída, definida por:

$$g(\varphi(k), \theta) = g(U^{k-1}, Y^{k-1}, \theta) \quad (3.4)$$

Assim, da caracterização da função  $g(\cdot)$  resultam dois elementos fundamentais associados ao paradigma de identificação de sistemas dinâmicos, designadamente, a escolha do vector de regressão e da função não-linear  $g: \mathcal{R}^{n_p} \mapsto \mathcal{R}$ . Neste contexto, as redes neuronais surgem, na perspectiva da identificação de sistemas, como uma possível estrutura de modelos (Ljung and Sjöberg, 1992).

### 3.2.3 Redes Neurais na Identificação de Sistemas Dinâmicos

A identificação de uma determinada relação entrada-saída, por meio de uma rede neuronal, a partir de um dado conjunto de dados de operação, como mecanismo de aprendizagem, é semelhante, conforme Girosi and Poggio (1990) referiram, ao problema da aproximação de uma dada função desconhecida a partir de um conjunto finito de pares de pontos, conhecido por regressão não-linear.

A questão central, subjacente à aproximação de funções, consiste em identificar o conjunto de funções  $f: \mathcal{R}^{n_p} \mapsto \mathcal{R}^{n_y}$  passíveis de ser representadas por uma dada sucessão finita de funções base, descrita genericamente por:

$$g(\varphi, w) = \sum_k w_k g_k(\varphi) \quad (3.5)$$

onde  $w$  representa o vector de pesos e  $\varphi$  o vector de regressão.

Como referido anteriormente, de entre as várias funções base candidatas à realização de tal aproximação, as redes neuronais apresentam-se como uma escolha possível e extremamente vantajosa (Sjöberg *et al.*, 1994).

A caracterização, numa base formal, das propriedades destas estruturas remonta ao ano de 1969 com a publicação do livro de Minsky e Papert, intitulado *Perceptrons* (cit. Haykin, 1994), onde são reconhecidas as limitações das redes neuronais monocamada. No entanto, foi a partir de 1989 que começaram a ser publicados estudos teóricos sobre as capacidades de aproximação universal das redes proactivas multicamada (MLP) (Cybenko, 1989).

A par das arquitecturas neuronais proactivas, as redes recorrentes, caracterizadas por retroacções, tanto ao nível interno como da saída, de alguns neurónios da rede, vieram gradualmente a ganhar importância, em particular, no campo da identificação de sistemas dinâmicos e no controlo de processos (vd. por exemplo Chu and Shoureshi, 1992; Draye *et al.*, 1996; Tsoi and Back, 1997; Poznyak *et al.*, 1999). Uma das suas características mais relevantes, tendo em vista a sua utilização na identificação de sistemas, prende-se com a capacidade de processar, de forma intrínseca, informação temporal, algo que não é inerente no caso das redes MLP estáticas.

A incorporação de retroacção possibilita que a topologia neuronal salvasse, em certa medida, um rasto informativo sobre o passado. Deste modo, a ideia dominante subjacente às várias arquitecturas recorrentes, quando aplicadas na identificação de sistemas dinâmicos, assenta basicamente na transferência para o processo de aprendizagem, da tarefa de construção de um mecanismo efectivo de memória do passado, que torne possível uma reprodução adequada do comportamento dinâmico do sistema a modelizar. Conforme sublinhado por Elman (1998), esta preservação da influência do passado não assenta em qualquer mecanismo de gravação da história da resposta do sistema, mas é antes conseguida através de um processo de aprendizagem intrínseco à própria estrutura neuronal.

Das várias arquitecturas recorrentes (Tsoi and Back (1997) identificaram 54 combinações possíveis), as redes de Jordan e de Elman apresentam-se com relevância para a identificação de sistemas. A primeira topologia caracteriza-se por uma retroacção ao nível das saídas da rede, enquanto que no segundo caso, a recorrência é estabelecida a partir da camada interna.

Dado o interesse deste trabalho na obtenção de representações no espaço de estados que caracterizem o comportamento dinâmico do sistema, nos casos em que a dimensão e/ou a complexidade do sistema desaconselhe a obtenção de um modelo analítico, considerou-se a modelização experimental por identificação baseada em redes neuronais recorrentes de Elman.

### 3.2.3.1 Topologia Recorrente de Elman

Na sequência do trabalho de Jordan para a inserção de propriedades dinâmicas no âmbito dos sistemas de processamento neuronais (Jordan, 1986), Elman (1990) sugeriu uma nova arquitectura constituída pelo mesmo número de camadas (quatro) e onde a retroacção é estabelecida entre a camada interna e uma camada adicional, designada por camada de contexto. Esta camada, contendo um número de neurónios idêntico ao incorporado na camada interna, tem por finalidade memorizar o valor das saídas dos neurónios da camada interna no instante imediatamente anterior.

Relativamente às funções de activação associadas às várias camadas constituintes, verifica-se que os neurónios da camada interna poderão apresentar funções de activação lineares ou não-lineares, sendo na versão original uma função do tipo sigmoideal, enquanto que na camada de saída, os respectivos neurónios realizam, necessariamente, uma transformação do tipo linear. Quanto aos pesos das conexões entre camadas refira-se que, exceptuando os que estão associados à retroacção entre a camada interna e a camada de contexto, permanecem fixos e apresentam um valor unitário. Os restantes pesos poderão ser adaptados no decurso do processo de aprendizagem.

Ao efectuar um estudo sobre as potencialidades computacionais desta topologia, Kremer (1995) mostrou que, do ponto de vista estritamente computacional, as redes de Elman se assemelham às máquinas de estados finitos.

Todavia, em virtude desta estrutura apresentar algumas limitações sob o ponto de vista da descrição de sistemas dinâmicos de ordem elevada, Pham and Xing (1995) sugeriram a incorporação de uma retroacção adicional ao nível da camada de contexto. Esta estrutura, denominada rede de Elman modificada por estes autores, é representada esquematicamente na Figura 3.2.

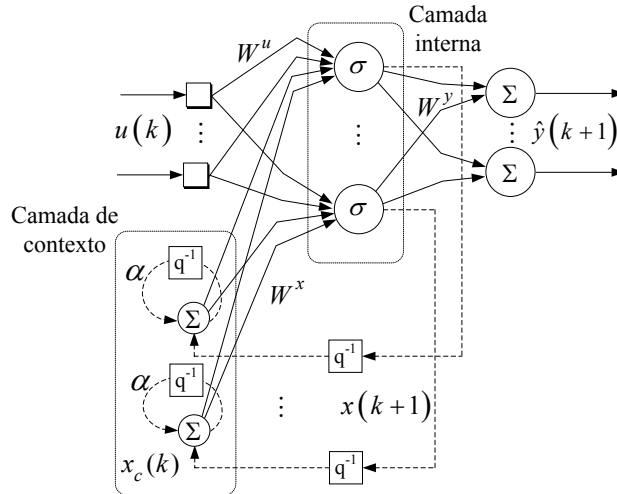


Figura 3.2: Representação esquemática da rede de Elman modificada.

De acordo com o modelo estrutural da rede de Elman modificada, as equações que caracterizam matematicamente esta topologia apresentam a seguinte forma:

$$\begin{cases} \hat{y}(k+1) = W^y x(k+1) \\ x(k+1) = \sigma(W^x x_c(k) + W^u u(k)) \\ x_c(k) = A x_c(k-1) + x(k) \end{cases} \quad (3.6)$$

onde  $W^y \in \mathcal{R}^{n_p \times n_x}$ ,  $W^x \in \mathcal{R}^{n_x \times n_x}$ ,  $W^u \in \mathcal{R}^{n_x \times n_u}$  e  $A \triangleq \alpha \mathcal{I}_{n_x \times n_x}$ ,  $\alpha \in \mathcal{R} \setminus \{0\}$ .

O parâmetro  $\alpha$ , associado às retroações estabelecidas no seio da unidade de contexto, apresenta um valor compreendido entre 0 e 1, sendo que a adopção de um valor próximo da unidade possibilita, regra geral, a agregação de uma janela de informação mais extensa (Pham and Xing, 1995).

Para a determinação das matrizes de ligação  $W^y$ ,  $W^x$  e  $W^u$ , propõe-se a utilização do algoritmo de retropropagação temporal do erro (*Backpropagation through time* – BPTT) (Werbos, 1990). Devido à complexidade computacional do algoritmo BPTT, considerou-se uma simplificação baseada na limitação da retropropagação da informação a um número fixo de passos temporais anteriores, usando uma janela deslizante.

Para obter uma representação linear do sistema dinâmico a partir do modelo não-linear definido em (3.6), determinam-se as derivadas das saídas em relação às entradas, extraindo-se os parâmetros do modelo linearizado (Henriques *et al.*, 1999).

### 3.3 Modelo Linear com Incertezas

Um dos aspectos a ter em consideração relativamente ao modelo de um processo corresponde à sua capacidade de representação do comportamento do processo nas várias situações de funcionamento. No sentido de representar o processo de uma forma o mais abrangente possível, considera-se que o comportamento dinâmico do processo pode ser caracterizado por um número finito de regimes nominais de funcionamento, sendo definido para cada um desses regimes um modelo. Outro aspecto a considerar prende-se com o facto da incerteza estar inevitavelmente presente na modelização de um sistema dinâmico.

As incertezas podem surgir principalmente como resultado de perturbações ou de alterações na dinâmica do processo. Como perturbações consideram-se os sinais externos que não são controláveis pelas entradas do processo nem dependem de qualquer variável interna do processo. Assim, as incertezas no modelo descrevem as discrepâncias entre o modelo considerado e o processo real.

Como origem da incerteza do modelo podem considerar-se três razões principais:

- *As incertezas do modelo são devidas a um conhecimento incompleto do sistema.* Como exemplo, refira-se que a estrutura das equações do modelo matemático pode ser determinada através das leis fundamentais que regem o processo, mas os valores numéricos dos parâmetros só são conhecidos dentro de determinadas tolerâncias. Por outro lado, também poderão existir incertezas se os parâmetros do modelo forem estimados por modelização experimental, dependendo do nível de ruído e da magnitude das perturbações que estavam presentes no processo aquando da realização da recolha de dados.

- *As incertezas do modelo poderão surgir pela simplificação do modelo.* Mesmo que o sistema original seja bem conhecido, o modelo resulta normalmente da consideração de hipóteses simplificadoras de forma a reduzir o esforço computacional ou a evitar as dificuldades inerentes à complexidade dos modelos completos. Como possíveis exemplos referem-se as características dinâmicas do processo não modelizadas (tipicamente, nas altas frequências), a simplificação do modelo por linearização ou a não inclusão da dinâmica de alguns componentes tais como sensores, actuadores, condicionadores ou transmissores.

- *As incertezas do modelo poderão ser causadas por uma estrutura inadequada do modelo.* Pretendendo-se fazer a descrição do processo por um modelo linear torna-se necessário omitir as variações dos parâmetros e as não-linearidades. Os efeitos de operações de redução de ordem do modelo e as alterações nos parâmetros devido ao desgaste natural de componentes do processo são possíveis exemplos.

As incertezas podem ser descritas de várias formas: limites na variação dos parâmetros do modelo linear, limites nas não-linearidades, limites do desempenho do sistema no domínio da frequência, etc.

Neste caso, considerou-se que a incerteza associada a um dado modelo  $M$  é descrita por um bloco  $\Delta$ , que produz uma perturbação no modelo,  $d$ , a partir da saída do processo  $v$ . Deste modo, o sistema dinâmico é descrito por uma estrutura  $M$ - $\Delta$  standard, conforme a representação da Figura 3.3.

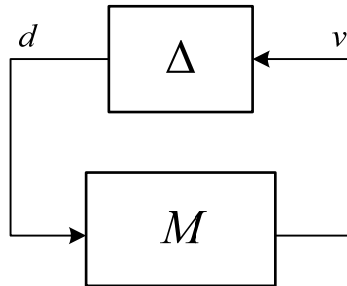


Figura 3.3: Configuração  $M$ - $\Delta$  standard.

Dado que estes erros de modelização podem afectar a estabilidade e o desempenho do sistema de diagnóstico e de controlo, importa adoptar uma descrição da incerteza que possibilite a definição de condições que garantam estabilidade e desempenho robustos.

Basicamente, existem dois tipos de incertezas: as incertezas não estruturadas e as estruturadas. Em ambos os casos é possível obter condições (necessárias e suficientes) de robustez.

### 3.3.1 Incertezas Não Estruturadas

A incerteza diz-se não estruturada quando várias fontes de incerteza são descritas como um único bloco de perturbação  $\Delta$ . No caso de sistemas lineares e invariantes no tempo (LTI), considera-se que o bloco  $\Delta$  pode ser representado por uma matriz de transferência desconhecida.

As incertezas não estruturadas podem ser descritas por várias configurações, tais como as que a seguir se indicam, em que o processo real é representado no domínio complexo (de variável complexa  $s$ ) por  $G_p(s)$  e o modelo nominal por  $G_0(s)$ :

i) Perturbação aditiva, com a configuração da Figura 3.4, descrita por:

$$G_p(s) = G_0(s) + \Delta(s) \quad (3.7)$$

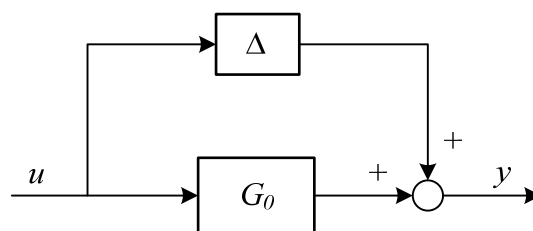


Figura 3.4: Configuração da incerteza como perturbação aditiva.

ii) Perturbação aditiva inversa, com a configuração da Figura 3.5, descrita por:

$$(G_p(s))^{-1} = (G_0(s))^{-1} + \Delta(s) \quad (3.8)$$

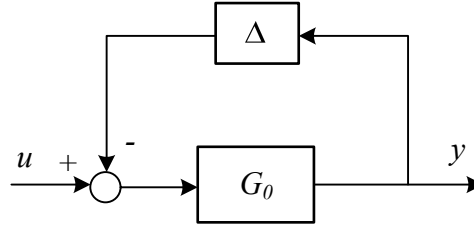


Figura 3.5: Configuração da incerteza como perturbação aditiva inversa.

iii) Perturbação multiplicativa à entrada, com a configuração da Figura 3.6, descrita por:

$$G_p(s) = G_0(s)[I + \Delta(s)] \quad (3.9)$$

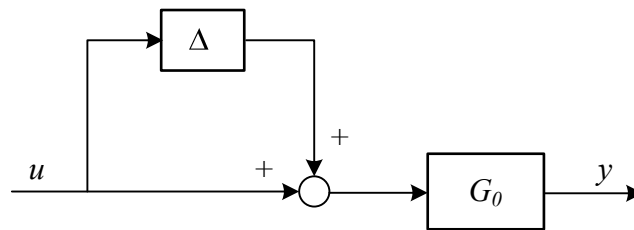


Figura 3.6: Configuração da incerteza como perturbação multiplicativa à entrada.

iv) Perturbação multiplicativa à saída, com a configuração da Figura 3.7, descrita por:

$$G_p(s) = [I + \Delta(s)]G_0(s) \quad (3.10)$$

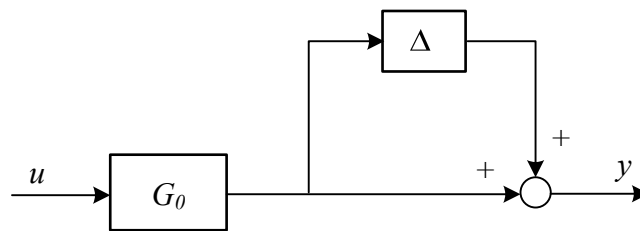


Figura 3.7: Configuração da incerteza como perturbação multiplicativa à saída.

v) Perturbação multiplicativa inversa à entrada, com a configuração da Figura 3.8, descrita por:

$$(G_p(s))^{-1} = [I + \Delta(s)](G_0(s))^{-1} \quad (3.11)$$

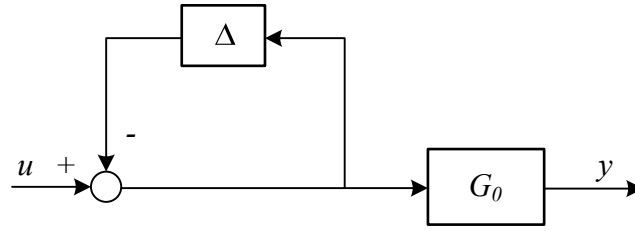


Figura 3.8: Configuração da incerteza como perturbação multiplicativa inversa à entrada

vi) Perturbação multiplicativa inversa à entrada, com a configuração da Figura 3.9, descrita por:

$$(G_p(s))^{-1} = (G_0(s))^{-1} [I + \Delta(s)] \quad (3.12)$$

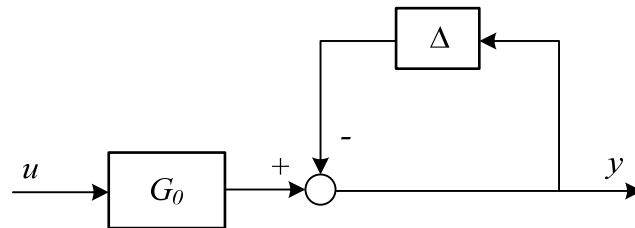


Figura 3.9: Configuração da incerteza como perturbação multiplicativa inversa à saída.

Nestas configurações, as representações aditivas da incerteza traduzem o erro absoluto entre a dinâmica do processo e a do modelo nominal, enquanto as multiplicativas representam os erros relativos.

### 3.3.2 Incertezas Paramétricas

As representações da incerteza não estruturada são adequadas para a descrição de dinâmicas não modelizadas ou omitidas à partida. Estas incertezas ocorrem essencialmente na gama das altas frequências e podem incluir atrasos temporais não modelizados, acoplamentos parasitas, histerese e outras não-linearidades. Contudo, algumas incertezas podem dever-se a uma descrição imperfeita das características de componentes do sistema. Estas situações podem ser representadas como variações de determinados parâmetros do sistema numa dada gama de valores, afectando, principalmente, o desempenho na gama das baixas frequências. Estas incertezas são denominadas incertezas paramétricas.

O bloco de perturbação  $\Delta$ , representado na Figura 3.10, é usado para descrever as incertezas paramétricas em termos da variação de parâmetros e pode ser descrito por:

$$\Delta = \text{diag} \left\{ \delta_1 I_{p_1}, \dots, \delta_{n_s} I_{p_{n_s}} \right\} : \delta_i \in \mathcal{C} \quad (3.13)$$



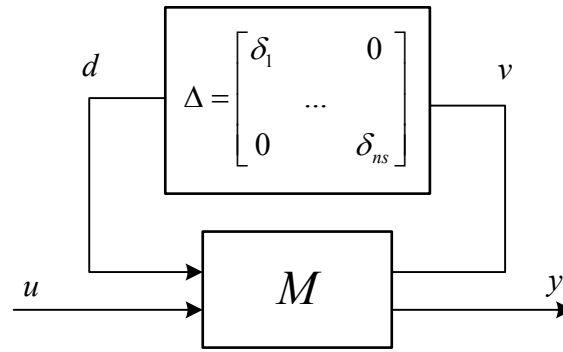


Figura 3.10: Representação da incerteza paramétrica.

Como se pode observar, o bloco  $\Delta$  é representado por uma matriz diagonal, enquadrando-se num tipo de incerteza estruturada que a seguir se descreve.

### 3.3.3 Incertezas estruturadas

Em muitos casos, a descrição da incerteza é feita através da combinação de incertezas não estruturadas e paramétricas. Daqui resulta a definição de incertezas estruturadas, devendo o bloco de perturbação  $\Delta$  ser configurado de forma a incluir as duas situações, obtendo-se a seguinte formulação geral:

$$\Delta = \text{diag} \left\{ \delta_1 I_{p_1}, \dots, \delta_{ns} I_{p_{ns}}, \Delta_1, \dots, \Delta_l \right\} : \delta_i \in \mathcal{C}, \Delta_j \in \mathcal{C}^{m_j \times m_j} \quad (3.14)$$

onde a dimensão do bloco  $\Delta$  é dada por:

$$n = \sum_{i=1}^{ns} p_i + \sum_{j=1}^l m_j$$

Deste modo, o bloco global inclui dois tipos de blocos de incerteza:  $ns$  blocos diagonais e  $l$  blocos densos. De referir que embora os parâmetros  $\delta_i$  possam ser valores reais, a análise e a síntese nestes casos é, normalmente, mais difícil de concretizar.

A consideração desta representação estruturada da incerteza permite efectuar uma análise mais realista do comportamento do sistema e obter soluções menos conservativas do que aconteceria se todo o bloco  $\Delta$  fosse definido de uma forma não estruturada.

### 3.3.4 Transformações Lineares Fraccionárias

A representação de um sistema por um modelo com incerteza através de uma configuração standard  $M$ - $\Delta$  (Figura 3.3), permite definir a forma como a incerteza afecta a relação entrada-saída do sistema em análise.

Esta representação foi usada, primeiramente, na década de 1950 na análise de circuitos (Redheffer, 1950 e 1960), tendo sido, posteriormente, adotada na formulação do controle robusto (Safonov, 1982).

Para representar formalmente a influência da incerteza no comportamento dinâmico do sistema, considera-se que a matriz de interconexão  $M$  é dividida de acordo com o formato representado na Figura 3.11, onde as dimensões de  $M_{11}$  concordam com as do bloco  $\Delta$ .

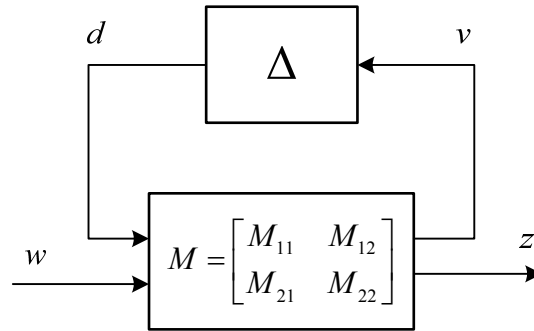


Figura 3.11: Configuração standard  $M$ - $\Delta$  com explicitação da matriz de interconexão  $M$ .

Daqui resulta a seguinte expressão para a relação entre a entrada  $w$  e a saída  $z$ :

$$z = \left[ M_{22} + M_{21}\Delta(I - M_{11}\Delta)^{-1} M_{12} \right] w \quad (3.15)$$

assumindo que a matriz  $(I - M_{11}\Delta)$  é invertível.

Quando esta inversa existe, define-se  $F(M, \Delta)$  como uma transformação linear fraccionária (*linear fractional transformation* - LFT) de  $M$  e  $\Delta$ . Dado que a conexão entre  $M$  e  $\Delta$  é estabelecida pelos elementos superiores da matriz  $M$ , esta transformação é denominada transformação linear fraccionária superior (*upper linear fractional transformation* - ULFT), representa-se por  $F_u(M, \Delta)$  e é dada por:

$$F_u(M, \Delta) = M_{22} + M_{21}\Delta(I - M_{11}\Delta)^{-1} M_{12} \quad (3.16)$$

De uma forma semelhante, pode-se estabelecer a conexão entre  $M$  e um bloco  $K$  da forma representada na Figura 3.12.

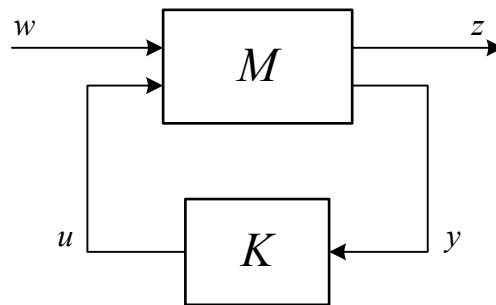


Figura 3.12: Configuração de uma transformação linear fraccionária inferior (LLFT).

Como esta conexão é realizada através dos elementos inferiores da matriz  $M$ , obtém-se a denominada transformação linear fraccionária inferior (*lower linear fractional transformation* - LLFT), representada por  $F_l(M,K)$  e definida por:

$$F_l(M, \Delta) = M_{11} + M_{12}K(I - M_{22}K)^{-1}M_{21} \quad (3.17)$$

Com a introdução da transformação linear fraccionária, as várias representações da incerteza não estruturada indicadas anteriormente, podem ser definidas pela configuração standard da Figura 3.11 usando as seguintes matrizes de interconexão  $M$ :

i) Perturbação aditiva:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & I \\ I & G_0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

ii) Perturbação aditiva inversa:

$$M = \begin{bmatrix} -G_0 & G_0 \\ -G_0 & G_0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

iii) Perturbação multiplicativa à entrada:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & I \\ G_0 & G_0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

iv) Perturbação multiplicativa à saída:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & G_0 \\ I & G_0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

v) Perturbação multiplicativa inversa à entrada:

$$M = \begin{bmatrix} -I & I \\ -G_0 & G_0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

vi) Perturbação multiplicativa inversa à saída:

$$M = \begin{bmatrix} -I & G_0 \\ -I & G_0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Neste trabalho, considerou-se que o processo é representado por um conjunto finito de modelos lineares com incerteza, em que esta é descrita por uma das configurações apresentadas anteriormente. A transformação linear fraccionária superior permite analisar a influência dessa incerteza na relação entrada-saída do processo e, assim, no seu comportamento dinâmico.

### 3.4 Controlo Robusto com Tolerância Passiva a Falhas

Um sistema de controlo diz-se robusto se a estabilidade e o desempenho de todo o sistema for assegurada na presença de incertezas. Se o sistema também assegurar robustez em relação a falhas, diz-se que o sistema de controlo apresenta tolerância passiva a falhas.

Além disso, se o sistema de controlo for estendido e integrar o controlador propriamente dito e o módulo de diagnóstico, obtém-se uma melhoria da fiabilidade e do desempenho do sistema relativamente às incertezas e às falhas previstas.

Desta forma, o objectivo principal do projecto é encontrar um sistema de controlo generalizado que assegure a robustez do sistema em malha fechada e o diagnóstico das falhas. Para resolver este problema considera-se uma abordagem de optimização em  $\mathcal{H}_\infty$ , que tem mostrado ser um método de projecto efectivo e eficiente em sistemas cuja representação seja linear e invariante no tempo.

Quando se pretende projectar um sistema de controlo e de diagnóstico de falhas para um determinado processo definem-se objectivos que dependem das condições de funcionamento do processo e das especificações pré-estabelecidas pelo nível de supervisão.

Embora estes objectivos sejam normalmente definidos em termos de parâmetros físicos, tecnológicos ou até económicos, assume-se que é possível fazer a sua conversão para requisitos relacionados com o comportamento estático e dinâmico do sistema em malha fechada.

Estas especificações de projecto podem ser divididas em quatro grupos fundamentais:

- i) Estabilidade: o sistema em malha fechada deverá ser assintoticamente estável.
- ii) Seguimento assintótico da trajectória da referência: Para uma dada classe de comandos de entrada, de perturbações externas e de falhas, deverá existir seguimento assintótico da referência, ou seja,  $\lim_{t \rightarrow \infty} ref(t) - y(t) = 0$ , sendo  $ref(t)$  a referência e  $y(t)$  a saída do sistema.
- iii) Especificações dinâmicas: o desempenho do sistema em malha fechada deverá satisfazer um dado conjunto de especificações, como por exemplo, os parâmetros que caracterizam a resposta do sistema a determinados sinais de entrada.
- iv) Diagnóstico de falhas: O módulo de diagnóstico de falhas deverá permitir a detecção, o isolamento e a identificação das falhas previstas, ou seja,  $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) - f(t) = 0$ , sendo  $r(t)$  o resíduo e  $f(t)$  a falha ocorrida.
- v) Robustez: As propriedades do sistema em malha fechada i) a iv) devem ser preservadas para uma dada classe de variações na dinâmica do sistema em malha fechada.
- vi) Tolerância a falhas: As propriedades do sistema em malha fechada i) a iii) devem ser preservadas na presença de falhas.

As especificações dinâmicas iii) e iv) são normalmente formuladas em termos de requisitos para as evoluções temporais de  $y(t)$ ,  $u(t)$  e  $r(t)$  em malha fechada, resultantes da resposta a alterações na referência, a perturbações ou a falhas.

Estas especificações no domínio temporal são frequentemente convertidas para o domínio da frequência, ou podem mesmo ser formuladas directamente como limites nas funções de transferência do sistema em malha aberta e em malha fechada.

A maior dificuldade do problema de projecto i) a vi) reside no facto de ambos os aspectos de desempenho e de incerteza terem de ser ponderados para obter um compromisso que seja aceitável. Perante esta situação, os aspectos i) a iv) são enquadráveis preferencialmente na teoria da optimização, enquanto os aspectos de robustez v) e de tolerância passiva a falhas vi) serão tratados de acordo com a teoria do controlo robusto.

Refira-se que nas aplicações práticas, as especificações do projecto não podem ser consideradas estanques à partida, pois poderão apresentar contradições entre si. Assim, o projectista terá de encontrar um compromisso adequado, comparando as possibilidades de satisfazer essas especificações com o correspondente esforço de controlo e com as características do próprio sistema.

Os principais problemas para o projecto do sistema de controlo podem ser sintetizados da seguinte forma:

- determinação da configuração de controlo e de diagnóstico (quais os sinais que devem ser medidos e que actuadores devem ser usados?);
- determinação da estrutura do controlador generalizado (quais as propriedades dinâmicas que devem ser incluídas no controlador e no módulo de diagnóstico?);
- determinação dos parâmetros do controlador e do módulo de diagnóstico.

Para dar resposta a estas questões, a teoria de controlo linear multivariável apresenta um grande conjunto de princípios, mas a maior parte deles tem como pressuposto a existência dum modelo preciso para o processo (situação nominal). Para o caso do projecto de um sistema robusto o projecto do controlador generalizado deverá ter em consideração os seguintes objectivos em relação ao comportamento do sistema em malha fechada:

- Estabilidade nominal (*Nominal Stability* - NS),
- Desempenho nominal (*Nominal Performance* - NP),
- Estabilidade robusta (*Robust Stability* - RS),
- Desempenho robusto (*Robust Performance* - RP).

### 3.4.1 Estabilidade nominal do sistema

Os sinais entre os blocos que constituem o sistema de controlo estão sujeitos a perturbações. Na prática não se pode desprezar o seu efeito pois podem provocar o aparecimento de outros sinais de maior amplitude noutra localização do sistema e assim levar à instabilidade.

Para estabelecer critérios de estabilidade, consideram-se as seguintes definições (Morari, 1989):

**Definição 3.1.** Um sistema de controlo é internamente estável se a introdução de sinais limitados num ponto qualquer do sistema gerar respostas limitadas em qualquer outro ponto.

**Definição 3.2.** Um sistema de controlo linear e invariante no tempo (de tempo contínuo) é internamente estável se as funções de transferência entre dois pontos quaisquer do sistema de controlo são estáveis - ou seja tenham todos os pólos no semi-plano esquerdo.

Assim, do ponto de vista da estabilidade interna e considerando o diagrama de blocos da Figura 3.13 (onde  $G(s)$  representa a função de transferência do sistema e  $K(s)$  a do controlador), verifica-se que o efeito das entradas  $d_y(t)$  e  $ref(t)$  em  $u(t)$  é idêntico.

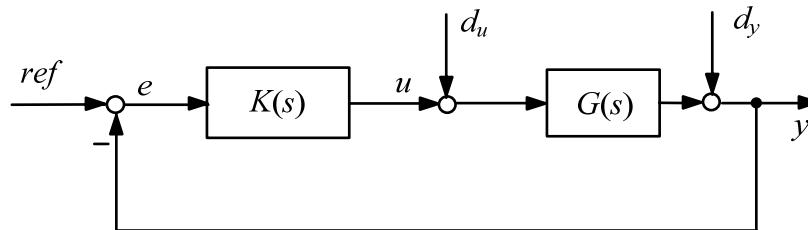


Figura 3.13: Diagrama de blocos para verificação da estabilidade interna.

Daqui pode chegar-se à conclusão que só existem duas saídas independentes (escolheram-se  $y(t)$  e  $u(t)$ ) e duas entradas independentes (escolheram-se  $ref(t)$  e  $d_u(t)$ ). Portanto, para o caso dum controlador de um sistema MIMO, para que exista estabilidade interna é necessário que cada bloco da matriz de transferência de (3.24) seja estável:

$$\begin{bmatrix} Y(s) \\ U(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} GK(I + GK)^{-1} & (I + GK)^{-1}G \\ K(I + GK)^{-1} & -K(I + GK)^{-1}G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ref(s) \\ D_u(s) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

### 3.4.2 Desempenho nominal do sistema

O objectivo mais elementar para um sistema de controlo é o de seguimento da trajectória da referência, ou seja, fazer com que o erro entre a saída do processo  $y(t)$  e a referência  $ref(t)$  seja o mais pequeno possível (de preferência nulo) mesmo quando o sistema é afectado por sinais externos (perturbações, alterações da referência ou falhas). Para quantificar o desempenho do sistema torna-se necessário usar medidas para o valor do erro.

Considere-se o diagrama simplificado dum sistema de controlo como o da Figura 3.14, onde  $G(s)$  representa o processo e  $K(s)$  o controlador a projectar. Os sinais  $ref(t)$ ,  $y(t)$ ,  $u(t)$ ,  $e(t)$ ,  $d(t)$  e  $n(t)$  são, respectivamente, a referência, a saída, a entrada de controlo, o sinal de erro ( $ref(t)-y(t)$ ), a perturbação na saída e o sinal de ruído.

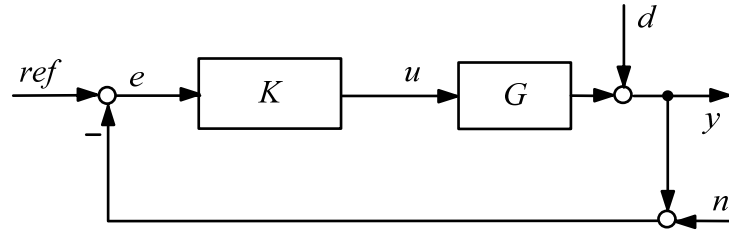


Figura 3.14: Diagrama simplificado dum sistema de controlo.

Daqui obtêm-se as seguintes relações entre as entradas e as saídas do sistema (simplificando a notação, não distinguindo a notação dos sinais no domínio temporal e da frequência):

$$\begin{aligned} y &= (I + GK)^{-1} GKref + (I + GK)^{-1} d - (I + GK)^{-1} GK n \\ u &= K(I + GK)^{-1} ref - K(I + GK)^{-1} d - K(I + GK)^{-1} n \\ e &= (I + GK)^{-1} ref - (I + GK)^{-1} d - (I + GK)^{-1} n \end{aligned} \quad (3.25)$$

Assumindo que os sinais  $ref$ ,  $d$  e  $n$  são limitados em energia e foram normalizados, para que as especificações de desempenho, como o seguimento da trajectória da referência, a atenuação da perturbação e a rejeição do ruído, sejam verificadas é necessário minimizar a norma- $\infty$ , ou seja, o ganho, das correspondentes funções matriciais de transferência. Assim, o problema de projecto traduz-se na procura, no conjunto de todos os controladores  $K$  que tornam o sistema em malha fechada estável, do controlador óptimo que minimiza as seguintes normas:

- i)  $\|(I + GK)^{-1}\|_{\infty}$  para garantir o seguimento da trajectória da referência e a atenuação do efeito da perturbação;
- ii)  $\|(I + GK)^{-1} GK\|_{\infty}$  para assegurar a rejeição do efeito do ruído;
- iii)  $\|K(I + GK)^{-1}\|_{\infty}$  para reduzir a energia associada ao esforço de controlo.

Convencionou-se que  $\mathcal{S} := (I + GK)^{-1}$  é a função sensibilidade e que  $\mathcal{T} := (I + GK)^{-1} GK$  é a função sensibilidade complementar, verificando-se  $\mathcal{S} + \mathcal{T} = I$ .

Em geral, para que os objectivos de desempenho sejam atingidos, são consideradas funções de ponderação para minimizar as normas indicadas. Por exemplo, para obter o seguimento da trajectória da referência, em vez de minimizar a função sensibilidade, resolve-se o problema definido como:

$$\min_{K \text{ estabilizante}} \|W_1 \mathcal{S} W_d\|_{\infty}$$

onde  $W_1$  é escolhida de acordo os requisitos de seguimento, sendo usualmente um filtro passa-baixo de ganho elevado, e  $W_d$  deve representar as características principais de todas as perturbações previstas. Geralmente, as funções de ponderação são estáveis e de fase mínima.

Analisando as normas a minimizar, poder-se-ia dizer que existe uma incompatibilidade entre os requisitos de seguimento da referência  $ref(t)$  e de supressão do efeito da perturbação  $d(t)$  (através da minimização da norma da função sensibilidade  $\mathcal{S}$ ) e o requisito de redução do efeito do ruído  $n(t)$  (através da minimização da norma da função sensibilidade complementar  $\mathcal{T}$ ). No entanto, isso não se verifica porque os requisitos são, normalmente, especificados em zonas de frequência distintas (os primeiros para frequências baixas e o segundo para frequências altas).

### 3.4.3 Estabilidade Robusta

Para corresponder ao objectivo de estabilidade robusta, começa-se por referir o Teorema do ganho pequeno (*Small-Gain Theorem*) que tem um papel fundamental nos métodos de optimização em  $\mathcal{H}_\infty$ , em especial nos que são usados para verificar a estabilidade robusta de um sistema. Em geral, este teorema apenas define uma condição suficiente para a estabilidade e, por isso, é potencialmente conservativo. Contudo, com a adequação do teorema aos problemas de optimização em  $\mathcal{H}_\infty$ , obtém-se uma condição que é suficiente e necessária.

Considere-se a configuração apresentada na Figura 3.15, onde  $G_1(s)$  e  $G_2(s)$  são funções de transferência matriciais que representam sistemas LTI. Neste contexto, obtém-se o seguinte teorema:

**Teorema 3.1** (Desoer and Vidyasagar, 1975): Se  $G_1(s)$  e  $G_2(s)$  são estáveis, i.e.  $G_1(s) \in \mathcal{H}_\infty$  e  $G_2(s) \in \mathcal{H}_\infty$ , então o sistema em malha fechada é internamente estável sse:  $\|G_1 G_2\|_\infty < 1$  e  $\|G_2 G_1\|_\infty < 1$ .

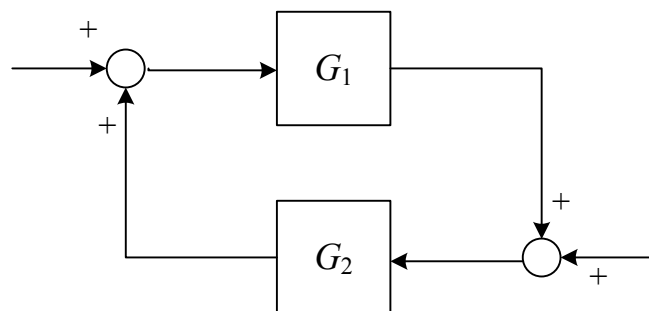


Figura 3.15: Uma configuração de realimentação.



O sistema em malha fechada com o processo  $G$  e um controlador  $K$  apresenta estabilidade robusta se o sistema se mantiver estável para todas as perturbações previstas. Daqui resulta, naturalmente, que o controlador  $K$  seja um controlador estabilizante para o sistema nominal  $G$ , visto que o conjunto de perturbações inclui a situação em que não há perturbação.

Considere-se, agora, o caso de uma perturbação aditiva, conforme se representa na Figura 3.16, onde  $\Delta(s)$  representa a perturbação através de uma matriz densa, desconhecida mas estável.

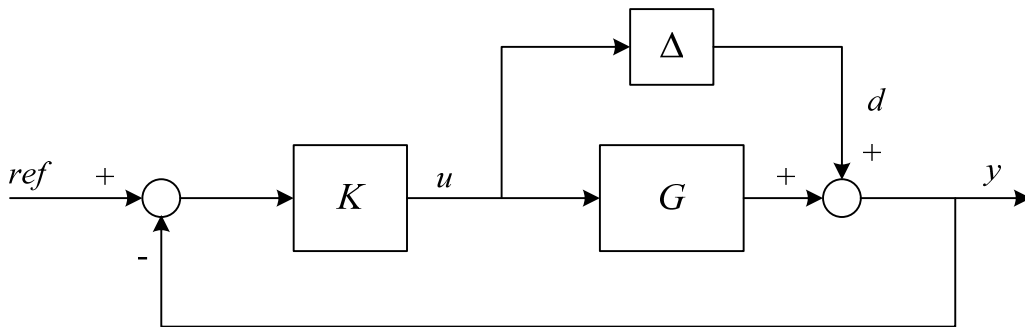


Figura 3.16: Configuração com perturbação aditiva.

A função de transferência entre  $u(t)$  e  $d(t)$  é dada por  $T_{ud} = -K(I + GK)^{-1}$  e, tal como referido anteriormente, o controlador  $K$  deve estabilizar o processo nominal  $G$ . Assim, a partir do teorema do ganho pequeno, obtém-se o seguinte teorema:

**Teorema 3.2** (Callier and Desoer, 1991; Morari and Zafiriou, 1989): *Considerando que  $\Delta(s)$  é estável, o sistema em malha fechada apresenta estabilidade robusta se  $K(s)$  estabilizar o processo nominal e as seguintes condições se verificarem:*

$$\|\Delta K(I + GK)^{-1}\|_{\infty} < 1$$

e

$$\|K(I + GK)^{-1}\Delta\|_{\infty} < 1$$

ou, num formato concentrado:

$$\|K(I + GK)^{-1}\|_{\infty} < \frac{1}{\|\Delta\|_{\infty}}.$$

Para encontrar um controlador que garanta a estabilidade robusta para o maior número possível de perturbações, usando a norma- $\infty$ , é necessário resolver o seguinte problema de minimização:

$$\min_{K \text{ estabilizante}} \|K(I + GK)^{-1}\|_{\infty}$$

Em muitos casos, poderá haver conhecimento prévio sobre a perturbação, traduzido por uma função de ponderação  $W_2$  definida no domínio da frequência  $\omega$ , verificando-se:

$$\bar{\sigma}(\Delta(j\omega)) \leq \bar{\sigma}(W_2(j\omega)) \quad , \forall \omega \in \mathcal{R} .$$

onde  $\bar{\sigma}(\cdot)$  representa o valor singular máximo.

Deste modo, o bloco de perturbação pode ser reescrito como  $\Delta(s) = \tilde{\Delta}(s)W_2(s)$ , em que  $\tilde{\Delta}(s)$  é o conjunto de perturbações de norma unitária.

Usando esta formulação, a condição de estabilidade robusta vem dada por:

$$\|W_2 K (I + GK)^{-1}\|_{\infty} < 1$$

e o problema de otimização correspondente é descrito por:

$$\min_{K \text{ estabilizante}} \|W_2 K (I + GK)^{-1}\|_{\infty} .$$

De igual modo, as condições de estabilidade robusta podem ser derivadas de forma semelhante para as outras configurações indicadas anteriormente, obtendo-se:

i) Perturbação aditiva inversa:

$$\|G(I + KG)^{-1}\|_{\infty} < \frac{1}{\|\Delta\|_{\infty}} \quad (3.26)$$

ii) Perturbação multiplicativa à entrada:

$$\|KG(I + KG)^{-1}\|_{\infty} < \frac{1}{\|\Delta\|_{\infty}} \quad (3.27)$$

iii) Perturbação multiplicativa à saída:

$$\|GK(I + GK)^{-1}\|_{\infty} < \frac{1}{\|\Delta\|_{\infty}} \quad (3.28)$$

iv) Perturbação multiplicativa inversa à entrada:

$$\|(I + KG)^{-1}\|_{\infty} < \frac{1}{\|\Delta\|_{\infty}} \quad (3.29)$$

v) Perturbação multiplicativa inversa à saída:

$$\|(I + GK)^{-1}\|_{\infty} < \frac{1}{\|\Delta\|_{\infty}} \quad (3.30)$$

De referir que, embora o Teorema 3.2 assuma a estabilidade do bloco de perturbação  $\Delta$ , as conclusões também são válidas se o sistema com a perturbação tiver o mesmo número de pólos no semi-plano direito que o sistema nominal (Lunze, 1988).

### 3.4.4 Valor Singular Estruturado

As condições definidas para obter estabilidade robusta são condições necessárias e suficientes quando as incertezas são não estruturadas, ou seja, quando o bloco  $\Delta$  é caracterizado por uma matriz densa. A aplicação destas condições à incerteza estruturada pode conduzir a resultados demasiado conservativos. Assim, para obter melhores resultados, considera-se o denominado valor singular estruturado (*Structured Singular Value* – SSV).

De acordo com Callier and Desoer (1991) e Morari and Zafiriou (1989), as condições de estabilidade robusta, resultantes do Teorema 3.2, podem ser escritas na seguinte forma equivalente (onde  $M$  representa a matriz de interconexões):

$$\det[I - M(j\omega)\Delta(j\omega)] \neq 0, \forall \omega \in \mathcal{R}, \forall \Delta \quad (3.31)$$

Esta condição de estabilidade robusta é suficiente e necessária, mesmo quando a incerteza é estruturada. Assim, numa linguagem menos rigorosa, para que um sistema em malha fechada apresente estabilidade robusta, todas as incertezas com uma dada estrutura devem ser suficientemente pequenas (i.e. não tornando  $I - M(j\omega)\Delta(j\omega)$  singular em qualquer frequência  $\omega$ ).

Além disso, para um dado  $M$  com um controlador fixo  $K$  e uma dada estrutura para a incerteza, a menor amplitude da incerteza que torna  $I - M(j\omega)\Delta(j\omega)$  singular numa frequência  $\omega$ , caracteriza a estabilidade robusta de  $K$  relativamente a essa incerteza estruturada. Esta medida corresponde ao valor singular estruturado que a seguir se descreve.

Considerando a definição de incerteza estruturada (3.14) e assumindo que o conjunto de blocos  $\Delta$  é limitado, define-se o conjunto normalizado de incertezas estruturadas  $\mathbf{B}\Delta$  como:

$$\mathbf{B}\Delta := \{\Delta : \bar{\sigma}(\Delta) \leq 1, \Delta \in \Delta\} \quad (3.32)$$

**Definição 3.3** Para  $M \in \mathcal{C}^{n \times n}$ , o Valor Singular Estruturado  $\mu_{\Delta}(M)$  de  $M$  em relação a  $\Delta$  é o número definido tal que  $\mu_{\Delta}^{-1}(M)$  seja igual ao menor  $\bar{\sigma}(\Delta)$  necessário para que  $(I - M\Delta)$  seja singular, ou seja:

$$\mu_{\Delta}^{-1}(M) := \min_{\Delta \in \Delta} \{\bar{\sigma}(\Delta) : \det(I - M\Delta) = 0\} \quad (3.33)$$

Se não existir nenhum  $\Delta \in \Delta$  tal que  $\det(I - M\Delta) = 0$ , então  $\mu_{\Delta}(M) := 0$ .

Quando  $M$  é uma matriz de transferência que define as interconexões representadas na Figura 3.11, o valor singular estruturado, relativamente a  $\Delta$ , é definido por:

$$\mu_{\Delta}(M(s)) := \sup_{\omega \in \mathcal{R}} \mu_{\Delta}(M(j\omega)) \quad (3.34)$$

Neste âmbito, o conjunto de incertezas pode ser definido por:

$$\mathcal{M}(\Delta) := \{\Delta(\cdot) \in \mathcal{RH}_\infty : \Delta(j\omega) \in \Delta, \forall \omega \in \mathcal{R}\} \quad (3.35)$$

De referir que, quando a estrutura da incerteza é fixa, o valor singular estruturado pode ser indicado por  $\mu(M)$ , omitindo a referência a  $\Delta$ .

Tendo em conta que o recíproco do valor singular estruturado designa uma margem de estabilidade dependente da frequência (de Gaston and Safonov, 1988; Safonov, 1982), a condição de estabilidade robusta em relação a incertezas estruturadas é agora definida no seguinte teorema:

**Teorema 3.3** (Doyle, 1982): *Seja  $M(s)$  um sistema realimentado nominal estável e  $\beta > 0$  um limite para a incerteza, i.e.  $\|\Delta\|_\infty \leq \beta, \forall \Delta(\cdot) \in \mathcal{M}(\Delta)$ . O sistema com a perturbação, representado na Figura 3.11, apresenta estabilidade robusta em relação a  $\Delta$ , sse  $\mu_\Delta(M(s)) < \frac{1}{\beta}$ .*

Daqui, conclui-se que se a incerteza pertencer a  $\mathbf{B}\Delta$ , a condição de estabilidade robusta é  $\mu_\Delta(M(s)) < 1$ . Como o valor  $\mu_\Delta(M(s))$  é dependente da frequência, deverá ser calculado para as frequências numa gama relevante para a aplicação em causa.

O valor singular estruturado tem um papel determinante no projecto de controladores robustos. Como foi referido, a abordagem de optimização em  $\mathcal{H}_\infty$  pode ser usada para resolver os problemas de estabilidade robusta em relação a incertezas não estruturadas e dar resposta aos requisitos de desempenho nominal. Para o caso da incerteza estruturada, o Teorema 3.3 proporciona uma condição necessária e suficiente para obter estabilidade robusta. Além disso, o requisito de desempenho robusto, também poderá ser transformado num problema de estabilidade robusta para incertezas estruturadas, como será descrito posteriormente.

Em seguida são apresentadas algumas das propriedades do valor singular estruturado, podendo ser obtida informação mais detalhada, por exemplo, em (Doyle, 1982; Fan and Tits, 1986; Packard, *et al.*, 1988; Fan, *et al.*, 1991; Packard and Doyle, 1993; Packard and Pandey, 1993; Zhou *et al.*, 1996). Para a computação de  $\mu$  foi usada, neste trabalho, a Toolbox para o Matlab (Balas *et al.*, 1995).

Considerando  $\rho(\cdot)$  o raio espectral de uma matriz quadrada, obtém-se o seguinte lema:

**Lema 3.1:** Sendo  $M$  uma matriz quadrada e constante, obtém-se:

$$\mu(M) = \max_{\Delta \in \mathbf{B}\Delta} \rho(M\Delta) \quad (3.36)$$

Outras propriedades do valor singular estruturado são:

$$\mu(\alpha M) = |\alpha| \mu(M) \quad , \forall \alpha \in \mathcal{C}$$

$$\det(I - M\Delta) \neq 0 \quad , \forall \Delta \in \mathbf{B}\Delta \quad \Leftrightarrow \quad \mu(M) < 1$$

$$\text{se } \{\Delta = \delta I_n : \delta \in \mathcal{C}\} (ns = 1, l = 0; p_1 = n) \quad \Rightarrow \quad \mu(M) = \rho(M)$$

$$\text{se } \Delta = \mathcal{C}^{n \times n} (ns = 0, l = 1; m_1 = n) \quad \Rightarrow \quad \mu(M) = \bar{\sigma}(M).$$

Nestas propriedades,  $ns$ ,  $l$  e  $n$  são as dimensões do conjunto de incerteza  $\Delta$ , de acordo com o estabelecido em (3.14).

Considerere-se agora o seguinte lema:

**Lema 3.2:** Dada a matriz  $M$ , verifica-se:

$$\rho(M) \leq \mu(M) \leq \bar{\sigma}(M)$$

Embora este lema estabeleça limites inferior e superior para  $\mu(M)$ , a sua utilização para a determinação de  $\mu(M)$  poderá não ser aconselhável devido ao facto de a distância entre esses dois limites poder ser arbitrariamente grande. Para obter limites mais adequados, consideram-se transformações de  $M$  que contribuam para a diminuição do intervalo entre  $\rho(M)$  e  $\bar{\sigma}(M)$ , sem que  $\mu(M)$  seja alterado. Para isso, considerem-se os seguintes conjuntos de matrizes constantes:

$$\mathbf{U} = \{U \in \Delta : UU^* = I_n\}$$

$$\mathbf{D} = \{D = \text{diag}[D_1, \dots, D_{ns}, d_1 I_{m_1}, \dots, d_l I_{m_l}] : D_i \in \mathcal{C}^{p_i \times p_i}, D_i = D_i^* > 0; d_j > 0, j = 1, \dots, l\}.$$

Estas matrizes  $\mathbf{U}$  e  $\mathbf{D}$  enquadram-se na estrutura de  $\Delta$ , apresentando  $\mathbf{U}$  uma estrutura diagonal, por blocos, de matrizes unitárias e, para qualquer  $D \in \mathbf{D}$  e  $\Delta \in \Delta$ ,  $D(D^{-1})$  permuta com  $\Delta$ . Além disso, para qualquer  $\Delta \in \Delta$ ,  $U \in \mathbf{U}$  e  $D \in \mathbf{D}$ , verifica-se:

$$U^* \in \mathbf{U}, U\Delta \in \Delta, \Delta U \in \Delta \quad \text{e} \quad \bar{\sigma}(U\Delta) = \bar{\sigma}(\Delta U) = \bar{\sigma}(\Delta)$$

$$D\Delta D^{-1} = \Delta, D\Delta D^{-1} \in \Delta, \quad \text{e} \quad \bar{\sigma}(D\Delta D^{-1}) = \bar{\sigma}(\Delta).$$

Um resultado importante é traduzido por:

$$\rho(MU) \leq \mu(MU) = \mu(M) = \mu(DMD^{-1}) \leq \bar{\sigma}(DMD^{-1}) \quad (3.37)$$

Nestas relações,  $\mu(MU) = \mu(M)$  é obtido a partir de:

$$\det(I - M\Delta) = \det(I - MUU^*\Delta) \quad \text{e} \quad U^*\Delta \in \Delta, \quad \bar{\sigma}(U^*\Delta) = \bar{\sigma}(\Delta),$$

enquanto  $\mu(M) = \mu(DMD^{-1})$  resulta de:

$$\det(I - DMD^{-1}\Delta) = \det(I - DM\Delta D^{-1}) = \det(I - M\Delta).$$

A partir das relações (3.37) e do resultado obtido por Doyle (Doyle, 1982), obtém-se o seguinte teorema:

**Teorema 3.4:**

$$\max_{U \in \mathcal{U}} \rho(MU) = \mu(M) \leq \inf_{D \in \mathcal{D}} \bar{\sigma}(DMD^{-1})$$

O principal resultado deste teorema consiste na definição de limites inferior e superior mais estreitos para  $\mu(M)$  do que os definidos no Lema 3.2. Infelizmente, este problema de otimização não é convexo, podendo  $\rho(MU)$  ter múltiplos máximos locais. Assim, a computação de  $\max_{U \in \mathcal{U}} \rho(MU)$  poderá não encontrar um máximo global. Por outro lado, o limite superior definido pelo Teorema 3.4, é relativamente fácil de determinar, visto que  $\bar{\sigma}(DMD^{-1})$  é convexo em  $\ln(D)$  (Doyle, 1987; Sezginer and Overton, 1990). Contudo, o limite superior nem sempre é igual a  $\mu(M)$ . Nos casos em que as dimensões satisfazem  $2ns + l \leq 3$ , demonstra-se que  $\mu(M) = \inf_{D \in \mathcal{D}} \bar{\sigma}(DMD^{-1})$ .

Deste modo, a determinação de  $\mu(M)$  traduz-se na resolução de um problema de otimização com transformação diagonal. De referir que a maioria dos algoritmos para a obtenção dos valores singulares estruturados calculam este limite superior.

### 3.4.5 Desempenho robusto

No projecto do sistema de controlo e do módulo de diagnóstico de falhas, além de satisfazer os requisitos de estabilidade nominal e robusta e de desempenho nominal, referidos anteriormente, importa assegurar a robustez do desempenho.

Como ponto de partida, considere-se a configuração  $M$ - $\Delta$  representada na Figura 3.17.

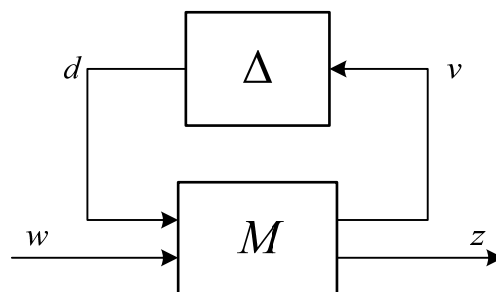


Figura 3.17: Configuração standard  $M$ - $\Delta$  para análise do desempenho robusto.

Os sinais indicados nesta figura são normalmente vectores. O sinal  $w$  representa as entradas externas, incluindo, tipicamente, os sinais de referência, os sinais de controlo, as

perturbações, o ruído ou as falhas; o sinal  $z$ , representa a saída de erro, incluindo, por exemplo, as saídas de regulação, os erros de seguimento da trajectória da referência, os erros de identificação das falhas, sinais de actuação filtrados; e os sinais  $v$  e  $d$ , são a entrada e a saída do bloco de perturbação associado à incerteza.

Assumindo que os sinais  $w$  e  $z$  são ambos de energia limitada, o requisito de desempenho pode ser traduzido pela minimização da norma em  $\mathcal{H}_\infty$  da função de transferência matricial entre  $w$  e  $z$ . Considerando a matriz  $M$  dividida de acordo com:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$$

obtém-se a relação entre a entrada  $w$  e a saída  $z$ :

$$\begin{aligned} z &= \left[ M_{22} + M_{21}\Delta(I - M_{11}\Delta)^{-1}M_{12} \right] w \\ &= F_u(M, \Delta)w \end{aligned} \quad (3.38)$$

Considerando que os vários elementos foram normalizados, a obtenção de um nível satisfatório para os requisitos de desempenho pode ser atingido se:

$$\|F_u(M, \Delta)\|_\infty < 1 \quad (3.39)$$

Esta equação implica a estabilidade de  $F_u(M, \Delta)$ , garantindo, conseqüentemente, a estabilidade robusta do sistema em relação às perturbações definidas por  $\Delta$ .

A condição (3.39) pode ser aplicada, de forma equivalente, ao sistema representado na Figura 3.18, garantindo a estabilidade robusta em relação ao bloco de incerteza fictícia  $\Delta_p$ . Este bloco, denominado bloco de incerteza de desempenho, é não estruturado, de dimensões apropriadas e satisfazendo  $\|\Delta_p\|_\infty \leq 1$ .

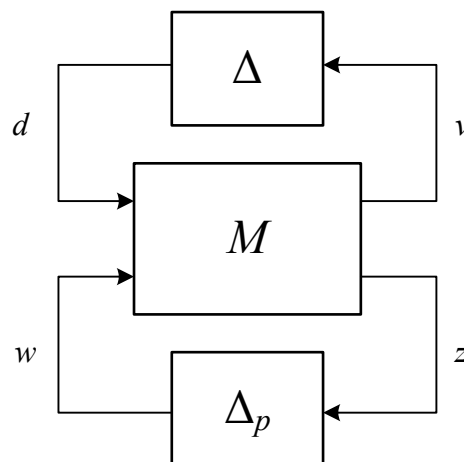


Figura 3.18: Configuração standard  $M$ - $\Delta$  com bloco de incerteza fictícia  $\Delta_p$ .

Para obter desempenho robusto a condição (3.39) tem de ser garantida para todos os blocos  $\Delta \in \mathbf{B}\Delta$ . Observando a Figura 3.18, pode-se afirmar que os requisitos de estabilidade e desempenho robustos podem ser enquadrados, de uma forma equivalente, num problema de estabilização robusta, conforme a configuração da Figura 3.3, substituindo o bloco de incerteza  $\Delta$  por uma estrutura de blocos aumentada definida por:

$$\tilde{\Delta} \in \tilde{\mathbf{A}} := \left\{ \text{diag} \{ \Delta, \Delta_p \} : \Delta \in \mathbf{B}\Delta, \|\Delta_p\|_{\infty} \leq 1 \right\} \quad (3.40)$$

Deste modo, o problema de desempenho robusto é convertido num problema de estabilidade robusta em relação à incerteza estruturada  $\tilde{\Delta}$ .

Resumindo as condições para os objectivos de projecto, obtém-se:

- Estabilidade nominal (NS)  $\Leftrightarrow M$  tem que ser internamente estável;
- Desempenho nominal (NP)  $\Leftrightarrow \|M_{22}\|_{\infty} < 1$ ;
- Estabilidade robusta (RS)  $\Leftrightarrow \mu(M_{11}) < 1$  para incerteza estruturada em  $\mathbf{B}\Delta$ ,  
 $\|M_{11}\|_{\infty} < 1$  para incerteza não estruturada;
- Desempenho robusto (RP)  $\Leftrightarrow \mu(M) < 1$  para incerteza estruturada em  $\tilde{\Delta}$ .

De notar que, se  $\Delta_p \equiv 0$ , a condição  $\mu(M) < 1$  implica  $\mu(M_{11}) < 1$ . Assim, a condição  $\mu(M) < 1$  garante simultaneamente a estabilidade robusta e o desempenho robusto.

### 3.5 Estrutura Proposta para o Sistema de Controlo e de Diagnóstico de Falhas

Ao definir a estrutura do sistema de controlo, propõe-se, neste trabalho, uma abordagem que considera a integração do controlador e do módulo de diagnóstico de falhas num sistema de controlo denominado generalizado. Com isso pretende-se obter um controlador com robustez em relação às falhas consideradas, ou seja, tolerância passiva às falhas, e, por outro lado, projectar de forma integrada o módulo de diagnóstico que gere resíduos que permitam identificar as falhas. Desta forma, pretende-se que o desempenho ao nível do diagnóstico de falhas apresente robustez relativamente às incertezas inerentes ao modelo do processo. Além disso, com esta abordagem o projecto tem em consideração a interacção entre o controlador e o módulo de diagnóstico. Aplicando esta abordagem, o controlador generalizado terá como saídas, a acção de controlo a enviar ao processo e um conjunto de resíduos especificados de forma a obter o isolamento das falhas previstas.

Para tornar possível a aplicação das técnicas de análise e de síntese de sistemas robustos, é necessário estabelecer uma configuração que mostre explicitamente a dependência do sistema em malha fechada relativamente ao controlador, obtendo-se a representação da Figura 3.19.



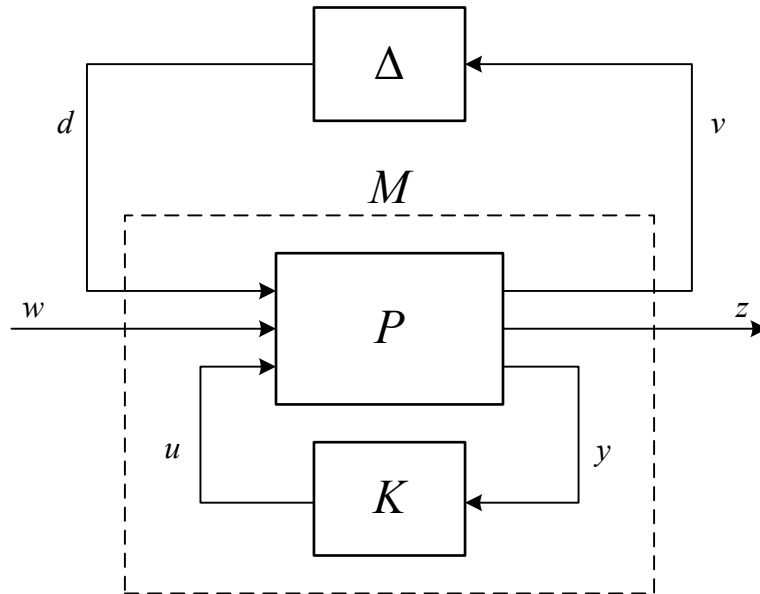


Figura 3.19: Configuração standard  $M$ - $\Delta$  com controlador  $K$ .

Nesta configuração, a função de transferência matricial  $P$  que define as várias interconexões, não inclui o controlador  $K$  nem qualquer das perturbações e das falhas previstas. Caso seja necessário, poderá ser integrado neste bloco um módulo de observadores para gerar estimativas em relação a variáveis de estado ou parâmetros que não sejam mensuráveis (Patton, 1997b; Hammouri *et al.*, 1999).

Considerando os sinais de entrada e de saída do bloco  $P$ , obtém-se o seguinte fraccionamento da matriz que o representa:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix}$$

Na Figura 3.19,  $y$  representa os sinais de realimentação (saídas mensuráveis, erros de seguimento de trajectórias, o sinal de entrada do controlador) e  $u$  o sinal de controlo (saída do controlador). A relação entre  $M$  e os blocos  $P$  e  $K$  vem dada por:

$$M(P, K) = F_l(P, K) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{13} \\ P_{23} \end{bmatrix} K (I - P_{33}K)^{-1} \begin{bmatrix} P_{31} & P_{32} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Onde  $M$  é explicitamente escrita como  $M(P, K)$  para mostrar que  $M$  resulta da transformação linear fraccionária de  $P$  e  $K$ .

Partindo desta configuração, propõe-se uma extensão que possibilite a integração do controlador e do módulo de diagnóstico num controlador generalizado  $K$ , obtendo-se a representação da Figura 3.20. Nesta representação também se explicita a constituição do bloco de incertezas, sendo neste caso composto pelo bloco de incerteza  $\Delta$ , propriamente dita, pelo bloco  $\Delta_p$  que representa incerteza fictícia associada ao desempenho convencional e pelo bloco  $\Delta_f$  que representa a incerteza fictícia correspondente ao diagnóstico de falhas.

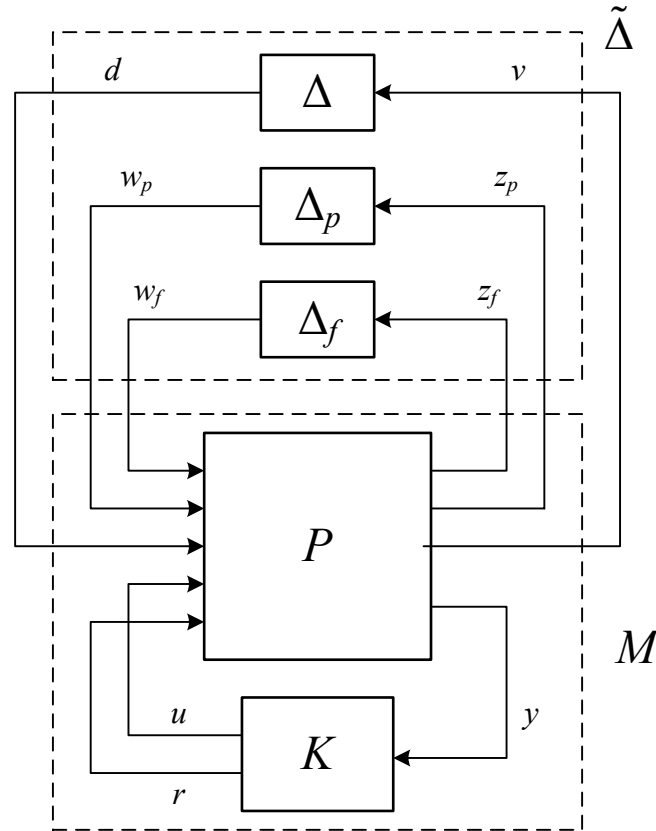


Figura 3.20: Configuração standard  $M$ - $\Delta$  com controlador generalizado  $K$  e incertezas fictícias.

Na Figura 3.20, além dos sinais representados na Figura 3.19,  $r$  representa os resíduos usados na identificação das falhas previstas e os pares  $z_p$ ,  $w_p$  e  $z_f$ ,  $w_f$  correspondem às entradas e saídas dos blocos de incerteza fictícia que representam o desempenho e as falhas, respectivamente. Assim, o bloco de incerteza  $\tilde{\Delta}$  apresenta uma estrutura de blocos aumentada definida por:

$$\tilde{\Delta} \in \tilde{\Delta} := \left\{ \text{diag} \{ \Delta, \Delta_p, \Delta_f \} : \Delta \in \mathbf{B}\Delta, \|\Delta_p\|_\infty \leq 1, \|\Delta_f\|_\infty \leq 1 \right\} \quad (3.42)$$

Apesar de se ter explicitado a estrutura do bloco de incerteza, os sinais  $z_p$  e  $z_f$  podem ser agregados num vector  $z$  e os sinais  $w_p$  e  $w_f$  num vector  $w$ , obtendo-se um problema equivalente ao descrito pela Figura 3.19.

Relativamente ao bloco  $P$ , trata-se de uma estrutura aumentada onde, para além do modelo do processo, se incluem as funções de transferência de ponderação que descrevem a incerteza, as especificações de desempenho e de diagnóstico de falhas e se efectua a normalização dos requisitos. Para que os resíduos  $r$  possibilitem a detecção, o isolamento e a identificação das falhas, as funções de ponderação que lhe estão associadas devem representar o comportamento das falhas previstas.

Para a definição das funções de ponderação, os trabalhos referenciados em (Lundström *et al.*, 1993a;1993b; Fryxell *et al.*, 1994; Balas *et al.*, 1995; Craig and MacLeod, 1995;

Engell, 1995; Corchero *et al.*, 2005) estabelecem critérios para a ponderação dos sinais associados ao controlador e os trabalhos descritos em (Nett, *et al.*, 1988; Tyler and Morari, 1994; Isermann, 1994; Niemann and Stoustrup, 1997, Stoustrup *et al.*, 1997; Ortega and Rubio, 2004; Petersen and McFarlane, 2004; Marcos and Balas, 2005) referem-se às funções de ponderação relacionadas com o modulo de diagnóstico.

### 3.5.1 Representação dos Objectivos

Os objectivos do sistema a projectar correspondem habitualmente a um conjunto de especificações em termos do comportamento desejado para o sistema em malha fechada e para os resíduos. O sistema de controlo generalizado deverá garantir a estabilidade e a satisfação desses objectivos quer em relação ao sistema nominal quer considerando as incertezas.

No sentido de garantir a aplicabilidade dos métodos de análise de robustez e de síntese, é aconselhável a definição de condições de desempenho através de normas de funções de transferência entre determinadas entradas e saídas da estrutura definida para o sistema global. Estas funções de ponderação também podem ser usadas para obter uma formulação normalizada do problema. Definidas as várias funções de ponderação associadas a cada sinal, obtém-se a definição aumentada do bloco  $P$ . Considerando esta formulação, o controlador e o módulo de diagnóstico deverão garantir, de uma forma robusta, a satisfação das condições de estabilidade e de desempenho, apesar da existência de incertezas.

Assim, os objectivos de desempenho podem ser traduzidos pela seguinte condição de desempenho:

$$\|(I + GK)^{-1}(j\omega)\|_{\infty} < \frac{1}{|W_z(j\omega)|} \quad (3.43)$$

em que  $W_z(j\omega)$  representa a função de ponderação que especifica o desempenho pretendido para o sistema.

A matriz de ponderação do sistema global,  $W_z(s)$ , é diagonal e constituída pelas funções de ponderação,  $w_{z_i}(s)$ , associadas aos sinais representativos dos requisitos de desempenho do projecto.

A especificação de cada função de ponderação pode ser definida usando a função de transferência indicada em (3.44) (Lundström *et al.*, 1991; 1993a; Fryxell *et al.*, 1994; Craig and MacLeod, 1995):

$$w_{z_i}(s) = \frac{1}{m_s} \frac{\tau_{mf}s + m_s}{\tau_{mf}s + e_{ss}} \quad (3.44)$$

Assim, de acordo com esta função de ponderação, se a condição  $\|W_z(s)S(s)\|_\infty < 1$  for satisfeita, garante-se que:

a) o erro em regime estacionário é menor que  $e_{ss}$ ;

b) a largura de banda do sistema em malha fechada é superior a  $\alpha\omega_B = 1/\tau_{mf}$  em que

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 - e_{ss}^2}{1 - \frac{1}{m_s^2}}};$$

c) a máxima amplificação do ruído de alta frequência é inferior a um factor igual a  $m_s$ .

O desempenho do sistema de controlo também pode ser traduzido por funções de ponderação dos sinais de actuação (Balas *et al.*, 1995; Lundström *et al.*, 1993a; Craig and MacLeod, 1995). Assim, as restrições em relação à energia do sinal de actuação podem ser estabelecidas por uma matriz de ponderação  $W_u(j\omega)$  (matriz diagonal constituída por funções de ponderação,  $w_{u_i}(s)$ ) para que a condição  $\|W_u KS(j\omega)\|_\infty < 1$  se verifique.

Cada função de ponderação  $w_{u_i}(s)$  é definida de forma a traduzir as capacidades dinâmicas dos actuadores, nomeadamente, em relação aos ganhos nas baixas e altas frequências e à máxima largura de banda.

Em relação aos sinais de entrada do sistema em malha fechada, referências, perturbações e falhas, aplicam-se funções de ponderação que permitem fazer a sua normalização e estabelecer o tipo de entradas admissíveis, ou seja, definir a classe de entradas para as quais o sistema de controlo generalizado deverá garantir robustez em termos de estabilidade e de desempenho.

Deste modo, para as entradas representadas pelos sinais  $w$  considera-se a matriz de ponderação  $W_w(j\omega)$  que permite obter os sinais normalizados  $\tilde{w}$  e estabelecer a seguinte classe de sinais de entrada:

$$w(j\omega) \in \{W_w \tilde{w}(j\omega) : \|\tilde{w}(j\omega)\|_\infty \leq 1\} \quad (3.45)$$

Definindo as várias funções de ponderações estabelece-se a estrutura do sistema nominal, restando a definição das incertezas.

### 3.5.2 Estrutura das incertezas

Tal como foi referido anteriormente, as incertezas do modelo do sistema,  $\Delta(s)$ , devem ser ponderadas de forma a garantir que  $\|\Delta_i(s)\|_\infty \leq 1$ . Considerando as incertezas definidas por uma classe multiplicativa à entrada, a classe de processos  $\mathcal{G}$  é dada por:

$$\mathcal{G}(s) := \{G_{nom}(s)(I + \Delta(s)W_i(s)) : \Delta(s) \text{ é estável, } \|\Delta(s)\|_\infty \leq 1\} \quad (3.46)$$

Admitindo que a incerteza do modelo é especificada em termos do valor máximo da incerteza em relação ao ganho ( $k_{imax}$ ) e ao tempo de atraso ( $\theta_{max}$ ), cada função de ponderação,  $w_i(s)$  (constituente da função de ponderação matricial  $W_i(s)$ ), pode ser descrita pela seguinte função de transferência (Lundström *et al.*, 1993a; 1993b; Craig and MacLeod, 1995):

$$w_i(s) = \frac{(1 + \frac{k_{imax}}{2})\theta_{max}s + k_{imax}}{\frac{\theta_{max}}{2}s + 1} \quad (3.47)$$

De referir que esta representação poderá não incluir todas as situações possíveis do sistema real, mas tem a vantagem de ser traduzida por uma função de transferência de ordem reduzida e em que os parâmetros têm um significado físico. Em (Lundström *et al.*, 1993b) são apresentadas mais indicações para a obtenção duma representação mais rigorosa da incerteza.

### 3.6 Análise e síntese $\mu$

O projecto do sistema de controlo generalizado para o processo representado por um modelo linear sem incertezas, resultaria na resolução do problema de encontrar um controlador  $K(s)$  que estabilizasse o sistema em malha fechada e minimizasse a norma  $\|F_l(P, K)\|_\infty$ , em que  $P$  e  $K$  correspondem aos sistemas indicados na Figura 3.20.

Esta situação corresponde à resolução de um problema de optimização em  $\mathcal{H}_\infty$  usando algoritmos como os que são descritos, por exemplo, em (Doyle *et al.*, 1989; Kwakernaak, 1993; Choi *et al.*, 1994).

Para que o controlador generalizado seja robusto, o sistema em malha fechada deve satisfazer as condições de estabilidade e de desempenho considerando a existência de incertezas. Deste modo, o problema de projecto consiste em encontrar um controlador  $K$  que verifique a seguinte condição:

$$\sup_{\omega \in \mathcal{R}} \mu_{\tilde{\Delta}}(M(P, K)(j\omega)) < 1 \quad (3.48)$$

A solução do problema também poderá ser convertida na resolução do seguinte objectivo em ordem a  $K(s)$ :

$$\inf_{K(s)} \sup_{\omega \in \mathcal{R}} \mu_{\tilde{\Delta}}(M(P, K)(j\omega)) \quad (3.49)$$

Para resolver o problema (3.49) utiliza-se um método iterativo denominado síntese  $\mu$  com iterações  $D$ - $K$  (Doyle and Stein, 1981; Doyle, 1985; Whidborne *et al.*, 1992; Balas *et*

al., 1994; 1995), que, embora não seja completamente fiável, em muitas situações é convergente e apresenta soluções para o controlador que verificam as condições de robustez de estabilidade e de desempenho.

O algoritmo de síntese  $\mu$  com iterações  $D$ - $K$  baseia-se na resolução do seguinte problema de optimização, para um controlador estabilizante  $K$  e uma matriz diagonal constante  $D$ :

$$\inf_{K(s)} \sup_{\omega \in \mathcal{R}} \inf_{D \in \mathbf{D}} \bar{\sigma} \left( DM(P, K)D^{-1}(j\omega) \right) \quad (3.50)$$

onde o conjunto das matrizes de escala  $\mathbf{D}$  é definido na secção 3.4.4.

A justificação para a resolução de (3.50) resulta do Teorema 3.4 e das considerações efectuadas sobre o resultado deste teorema, substituindo  $\mu(M(P, K))$  pelo seu limite superior  $\inf_{D \in \mathbf{D}} \bar{\sigma} \left( DM(P, K)D^{-1} \right)$ .

Relativamente ao problema formulado em (3.48), pretende-se obter um controlador estabilizante que satisfaça a condição:

$$\sup_{\omega \in \mathcal{R}} \inf_{D \in \mathbf{D}} \bar{\sigma} \left( DM(P, K)D^{-1}(j\omega) \right) < 1 \quad (3.51)$$

Para a obtenção duma solução, o método iterativo  $D$ - $K$  propõe que, alternativamente, se minimize a condição (3.50), ou se reduza o valor do lado esquerdo da condição (3.51), para  $K(j\omega)$  (mantendo  $D(j\omega)$  fixo) e em  $D(j\omega)$  (mantendo o controlador  $K(j\omega)$  fixo), realizando a primeira em relação a  $K(j\omega)$ .

Refira-se que a minimização para  $K(j\omega)$  corresponde à resolução de um problema de optimização em  $\mathcal{H}_\infty$  dado por:

$$\inf_{K(s)} \left\| DM(P, K)D^{-1} \right\|_\infty \quad (3.52)$$

que poderá ainda ser escrito como:

$$\inf_{K(s)} \left\| DF_l(P, K)D^{-1} \right\|_\infty = \inf_{K(s)} \left\| F_l(\tilde{P}, K) \right\|_\infty \quad (3.53)$$

com  $\tilde{P} = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} D^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$  compatível com a subdivisão de  $P$ .

Por outro lado, com  $K$  fixo, a obtenção de  $\inf_{D \in \mathbf{D}} \bar{\sigma} \left( DM(P, K)D^{-1}(j\omega) \right)$  é um problema de optimização convexa em cada frequência  $\omega$ . Depois da minimização ao longo da gama de frequências de interesse, as matrizes diagonais  $D$  resultantes, podem ser aproximadas, pelo método de ajuste de curva (*curve fitting*), a uma função de transferência matricial  $D(s)$  racional, estável e de fase mínima, a qual poderá ser usada na próxima iteração para  $K$ .

Deste modo, o algoritmo de síntese  $\mu$  pelo método iterativo  $D$ - $K$  é definido pelos seguintes passos:

- 1) Começar com uma matriz inicial  $D$ , habitualmente,  $D=I$ .
- 2) Fixar  $D$  e resolver o problema de optimização em  $\mathcal{H}_\infty$  em relação a  $K$ :

$$K = \arg \inf_K \|F_l(\tilde{P}, K)\|_\infty$$

- 3) Fixar  $K$  e resolver o seguinte problema de optimização convexa em  $D$  para cada frequência ao longo de uma gama de frequências seleccionadas:

$$D(j\omega) = \arg \inf_{D \in \mathcal{D}} \bar{\sigma}(DF_l(P, K)D^{-1}(j\omega))$$

- 4) Aplicar o método de ajuste de curva a  $D(j\omega)$  para obter  $D(s)$  estável e de fase mínima. Ir para o passo 2 e repetir até que seja atingida a tolerância predefinida de convergência para (3.51) ou seja atingido o número máximo predefinido de iterações.

De referir que o algoritmo pode não convergir e o controlador resultante pode ser demasiado conservativo, principalmente quando se consideram perturbações reais, devido ao eventual alargamento do intervalo entre  $\mu(M)$  e  $\inf_{D \in \mathcal{D}} \bar{\sigma}(DMD^{-1})$ .

Além disso, a ordem do controlador resultante da aplicação do algoritmo poderá ser demasiado elevada, devendo aplicar-se, nestes casos, um método para a redução de ordem (vários exemplos em Samar *et al.*, 1995). Para obter um controlador de ordem reduzida considera-se, frequentemente, uma das seguintes alternativas: i) redução de ordem do modelo do processo seguido do projecto do controlador; ii) projecto do controlador seguido da redução de ordem do controlador; iii) projecto directamente orientado para a obtenção de controladores de ordem reduzida.

Para minimizar a ordem do controlador é desejável que o sistema  $P$  e a função  $D(s)$  tenham ordens o mais baixo possível.

### 3.7 Conclusão

Neste capítulo descreveu-se a metodologia proposta para o projecto integrado de controladores robustos com tolerância passiva a falhas e de um módulo de diagnóstico para a geração de resíduos que permitam a identificação de falhas. A metodologia proposta baseia-se no modelo linear com incerteza do processo e nas técnicas de análise e síntese de controlo robusto.

Dado que a abordagem de projecto é baseada no modelo do processo, introduziu-se a questão de modelização de sistemas dinâmicos usando, quando necessário, a identificação do modelo não-linear sob a perspectiva de um problema de regressão não-linear, usando redes neuronais. Em particular, propôs-se a utilização de uma topologia recorrente de Elman.

Considerando que o processo é representado por um ou mais modelos lineares com incertezas, descreveram-se as configurações para a representação da incerteza estruturada e não estruturada.

Para a descrição das incertezas e dos objectivos de controlo e de diagnóstico de falhas considerou-se a formulação em  $\mathcal{H}_\infty$  usando uma extensão da configuração standard  $M-\Delta$ .

Os elementos fundamentais para a estruturação do problema são a definição das funções de ponderação associadas a cada sinal que intervém na formulação do problema e o estabelecimento da matriz de interconexões. Para obter as funções de ponderação que permitem normalizar cada sinal de entrada e de saída da estrutura, indicaram-se algumas funções tipificadas.

Para obter o controlador com tolerância passiva a falhas e o módulo de diagnóstico propõe-se a aplicação do método de análise e síntese  $\mu$  com o procedimento iterativo  $D-K$ .

Dado que a representação obtida apresenta, normalmente, ordem elevada, sugere-se a aplicação de uma técnica de redução de ordem.

Como resultado da abordagem proposta neste capítulo, os resíduos gerados pelo módulo de diagnóstico deverão ser representativos das falhas previstas e a acção de controlo deve apresentar tolerância a essas falhas. O controlador e o módulo de diagnóstico devem apresentar robustez em relação à incerteza considerada na formulação do problema.

Caso o processo seja representado por vários modelos lineares com incerteza, associados aos modos de funcionamento, o procedimento descrito será aplicado a cada um dos modelos. Uma das tarefas do supervisor será a selecção do controlador generalizado, de acordo com o modo de funcionamento do processo.

Os resíduos serão usados pelo sistema de supervisão para efeitos de monitorização e de geração de acções correctivas que permitam acomodação das falhas identificadas.

No capítulo 4 será apresentada a arquitectura do sistema de supervisão e será feita a descrição dos módulos principais.



## **4. Controlo com Tolerância Activa a Falhas**

Neste capítulo apresenta-se a estrutura da arquitectura adoptada para o sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas e as metodologias associadas aos módulos do sistema de supervisão que possibilitam a realização da acomodação das falhas e da reconfiguração do processo em caso de avaria.

Após a introdução da secção 4.1, apresenta-se na secção 4.2 a abordagem seguida para a definição do sistema de supervisão e controlo com tolerância activa a falhas, descrevendo os níveis de processo, de execução e de supervisão. Na secção 4.3 apresenta-se a abordagem proposta para a reconfiguração do sistema em caso de falha, usando sensores e actuadores virtuais. Define-se o problema de reconfiguração e descreve-se a abordagem considerada.

Tendo em vista a tolerância activa a falhas, a secção 4.4 descreve os elementos principais do sistema de supervisão, terminando na secção 4.5 com as conclusões mais relevantes.

### **4.1 Introdução**

O conceito de controlo tolerante a falhas (Zhang and Jiang, 2003) surgiu na década de 1980 através do controlo com tolerância a falhas em aviões (denominado na altura como controlo reestruturável ou auto-reparável de aviões), veio a despontar a nível científico como um objectivo a considerar no projecto de sistemas de controlo no primeiro congresso IFAC SAFEPROCESS de 1991 e tem vindo a desenvolver-se de uma forma significativa desde o início deste século.

O controlo tolerante a falhas envolve, essencialmente, o projecto e a implementação de sistemas de controlo de processos que evitem o funcionamento incorrecto do processo quando surgem falhas em sensores, actuadores ou em componentes do processo e, deste modo, aumentar a fiabilidade dos vários componentes do processo e, conseqüentemente, de todo o sistema. Uma forma alternativa, por vezes denominada por perfeccionista, seria procurar evitar as falhas e as conseqüentes avarias através da utilização de componentes (usualmente sistemas eléctricos ou mecânicos) com um tempo de vida elevado e com o seu prolongamento garantido através de operações de manutenção regulares e pela substituição dos elementos de maior desgaste.

A tolerância a falhas é habitualmente classificada como passiva ou activa, em função da abordagem e das metodologias que são consideradas para tratar as falhas. Depois da proposta apresentada no capítulo 3 para a obtenção de um sistema de controlo com tolerância passiva a falhas, propõe-se neste capítulo uma abordagem de tolerância activa com um sistema de supervisão que utiliza os resíduos gerados pelo módulo de diagnóstico de falhas e que tira partido das redundâncias existentes no sistema. O sistema de supervisão deverá identificar as falhas e o seu grau de severidade, os componentes afectados por essas falhas e, em função dessa informação, desencadear as acções correctivas necessárias à acomodação dessas falhas, à reconfiguração do sistema em caso de avaria do componente em causa ou, no caso limite, à paragem de funcionamento do sistema em segurança. Para que o supervisor possa concretizar os seus objectivos é fundamental que os mecanismos de diagnóstico de falhas gerem a informação de identificação da falha de uma forma adequada e oportuna (Blanke *et al.*, 2003).

A estratégia a aplicar para obter tolerância activa a falhas depende do componente onde a falha ocorreu e da sua localização em termos de malha de controlo. Em primeiro lugar, se o processo apresenta redundância física, ou seja, se existe outro componente (sensor, actuador ou um componente do processo) disponível que realize a mesma função do elemento em causa, a estratégia a seguir passará pela desactivação do componente com falha e pela activação do seu substituto. Em muitos processos reais este tipo de redundância não existe, quer por razões económicas quer devido a dificuldades de implementação por limitações físicas do próprio processo.

Em alternativa, procura-se explorar a chamada redundância analítica em que, para o caso de falhas em sensores, o sistema de supervisão usa a informação disponível para a reconstrução da medida afectada pela falha. Assim, a acomodação de falhas em sensores considera os denominados sensores virtuais, substituindo a medida gerada pelo sensor em falha por uma estimação baseada na informação disponibilizada pelos restantes sensores do sistema (mecanismo também chamado de fusão sensorial). Para o caso de falhas em actuadores ou em componentes do processo, considera-se uma abordagem baseada em actuadores virtuais de forma a obter a acomodação da falha através da alteração da lei de controlo. Esta alteração traduz-se num reajuste dos sinais de controlo, evitando a incorporação de componentes redundantes.

## 4.2 A Arquitectura do Sistema

Os sistemas de supervisão e controlo com tolerância activa a falhas são estruturados, essencialmente, em três níveis: o nível de processo, o nível de execução e o nível de supervisão. No diagrama da Figura 4.1, apresenta-se a estrutura global da arquitectura do sistema, proposta neste trabalho, com a indicação dos módulos principais em cada nível do sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas.

A abordagem proposta para o projecto do sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas engloba os seguintes aspectos fundamentais:

- i) **Modelização:** dado que a abordagem proposta é baseada no modelo do processo, considera-se a existência de um modelo, geralmente não-linear, obtido por via analítica ou por identificação, usando, por exemplo, técnicas baseadas em redes neuronais. Pretende-se que este modelo represente o processo real, o mais fielmente possível, nos seus vários modos de funcionamento, nominais ou com falhas. Este modelo será utilizado para a simulação do processo real e para a obtenção de um conjunto de modelos lineares com incertezas que caracterizam os modos de funcionamento previstos (com e sem falhas) para o processo.
- ii) **Validação dos sinais sensoriais:** a um nível básico, os sinais de saída dos elementos sensoriais devem ser sujeitos a um processo de acondicionamento, filtragem e validação. Deste modo, pretende-se aferir o grau de validade do sinal produzido pelo sensor e efectuar operações de tratamento de dados, de modo que a informação sobre as variáveis processuais seja o mais fidedigna possível. As principais operações de validação de um sinal sensorial consistem na análise dos seus limites, da razão de variação e do respectivo espectro de frequências.
- iii) **Sistema de observação:** A partir da análise estrutural do processo, estabelecem-se as relações analíticas redundantes, baseadas essencialmente em observadores, que permitam estimar o valor de variáveis que não sejam mensuráveis ou que estejam associadas a sensores com falha.
- iv) **Sistema de controlo:** Considerando que o processo (com funcionamento nominal ou em falha) é caracterizado por um conjunto de modelos lineares com incerteza (modelos múltiplos), o sistema de controlo é definido por um conjunto de controladores, associados a cada modelo do processo. Os controladores são projectados, fundamentalmente, usando a formulação de controlo robusto em  $H_\infty$  e técnicas de síntese baseadas no valor singular estruturado  $\mu$ . Para cada modelo do processo, deve existir, um controlador que garanta robustez de estabilidade, de desempenho e de tolerância passiva a falhas de menor grau de severidade.

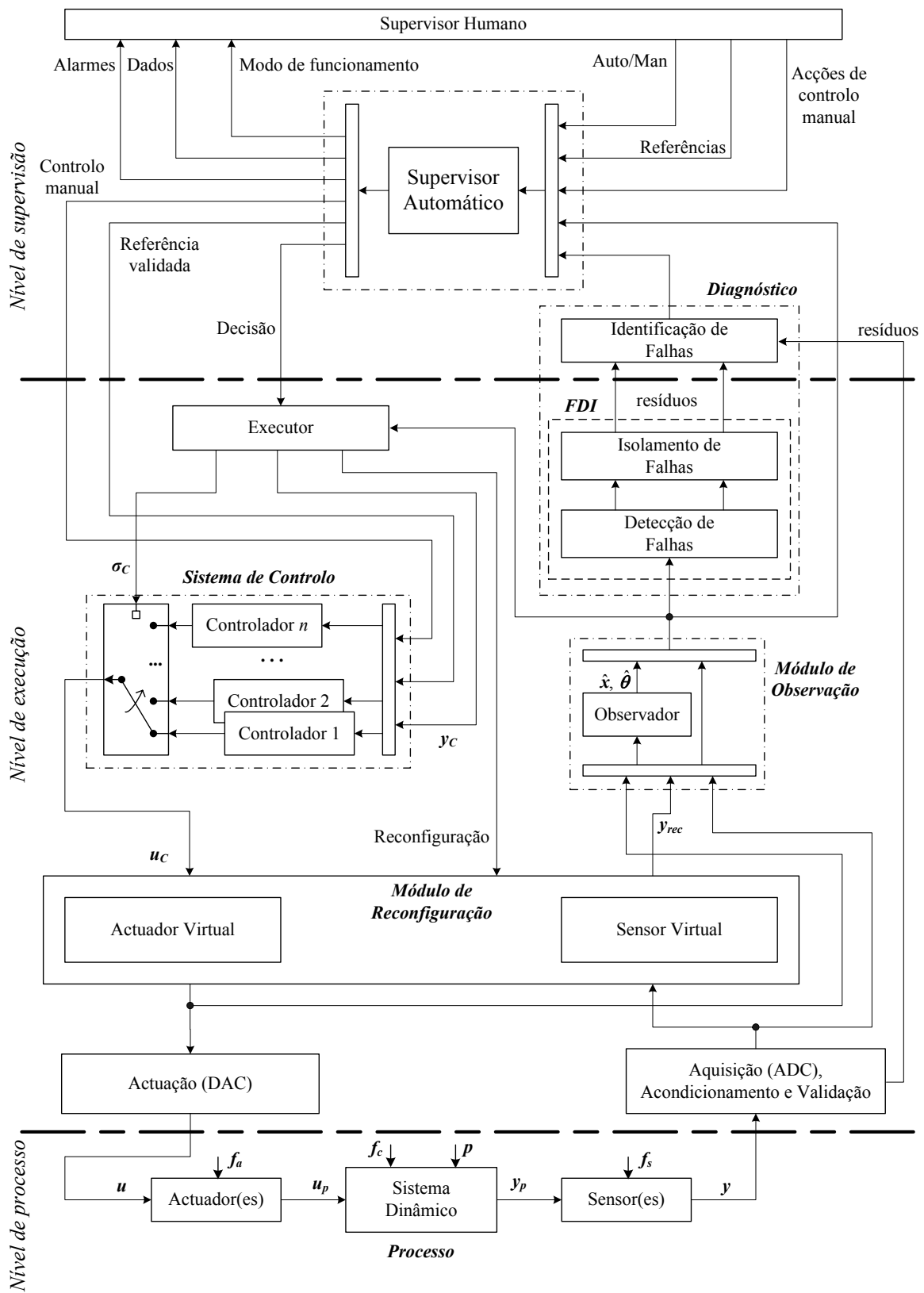


Figura 4.1: Diagrama da arquitectura global do sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas.

- v) **Sistema de diagnóstico de falhas:** O sistema de diagnóstico de falhas tem uma função preponderante em todo o sistema de supervisão, tendo em vista a tolerância a falhas, pois é responsável por detectar, isolar e identificar a ocorrência de uma determinada falha no processo. A abordagem proposta considera o projecto do módulo de diagnóstico integrado no projecto do controlador, usando uma formulação de controlo robusto em  $\mathcal{H}_\infty$ . As saídas geradas pelo módulo formam um conjunto de resíduos representativos das falhas previstas, sendo usadas pelo sistema de supervisão para identificação do modo de funcionamento do processo.
- vi) **Sistema executor:** As decisões geradas no sistema de supervisão são traduzidas em acções no sistema executor, determinando, essencialmente, a comutação do controlador, a acomodação das falhas usando sensores e actuadores virtuais e a reconfiguração do processo.
- vii) **Sistema de supervisão:** O sistema de supervisão é constituído por módulos que possibilitam o fornecimento de serviços ao supervisor humano e ao sistema executor, conforme foram enumerados anteriormente. Estes módulos são projectados usando metodologias que se baseiam em lógica (máquinas de estado) ou em lógica difusa, para que os procedimentos de supervisão sejam automatizados e interpretáveis pelo supervisor humano. O sistema de supervisão tem como missão principal garantir que o sistema global é estável, robusto e tolerante a falhas. Em situações limite, em que o sistema de controlo não apresenta capacidade de tolerância a uma determinada falha, o supervisor deverá colocar de uma forma segura o processo fora de funcionamento.
- viii) **Interface humano-máquina:** Para que um sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas seja aceite e compreendido pelo supervisor humano, é necessário que a interface humano-máquina permita uma clara interpretação de todos os procedimentos que o sistema de supervisão desencadeia e uma informação correcta do modo de funcionamento do processo. Em particular, devem ser gerados alarmes gradativos que indiquem a ocorrência de uma falha e elementos gráficos que permitam identificar as falhas e as situações de reconfiguração, eventualmente com alteração dos objectivos definidos.

### 4.2.1 Nível de Processo

No nível de processo, localizado na base da estrutura, encontram-se o processo, os sensores e os actuadores. O processo é caracterizado por um sistema dinâmico, usualmente, não linear, com entradas de actuação  $\mathbf{u}_p$ , saídas mensuráveis  $\mathbf{y}_p$  e sujeito a perturbações  $\mathbf{p}$  e a falhas  $\mathbf{f}_p$ . Em geral, o processo é constituído por vários componentes (subsistemas) que estão sujeitos a falhas (funcionamento defeituoso, alteração de parâmetros que caracterizam o comportamento dinâmico de cada componente ...).

Os actuadores estabelecem o interface entre o sinal gerado pelo sistema de controlo,  $u$ , e as entradas controláveis do processo e podem ser afectados por falhas  $f_a$  (saturação, desvios do funcionamento normal, alteração do comportamento dinâmico ...).

Os sensores acoplados a transdutores obtêm os valores das grandezas mensuráveis do processo,  $y$ . Os sinais obtidos pelos elementos sensoriais podem ser corrompidos por falhas  $f_s$  (quebra de funcionamento, desvios do seu funcionamento normal ...). Nos vários componentes do sistema, principalmente nos sensores, verifica-se, normalmente, a influência de ruído.

A interligação do sistema de supervisão e controlo com o processo é estabelecida através de um sistema computadorizado de aquisição de dados e de actuação, incluindo o elemento de conversão analógico-digital (ADC) e o de conversão digital-analógico (DAC). Associadas ao processo de aquisição realizam-se operações de acondicionamento sobre os sinais, incluindo, normalmente, um mecanismo de filtragem, e são realizados testes de validação.

Estes testes podem constituir um primeiro nível de detecção de falhas e incluem, habitualmente, a verificação se o valor absoluto ou a evolução de uma dada variável medida excede determinados limites pré-especificados. Poder-se-á ainda verificar a plausibilidade dos valores medidos.

Assim, o teste ao valor absoluto do sinal é feito através das seguintes condições:

$$y_{\min} < y(t) < y_{\max} \quad (4.1)$$

em que os limites  $y_{\min}$  e  $y_{\max}$  definem o intervalo de validade do sinal  $y(t)$ .

Para avaliar a variação do sinal  $y(t)$ , efectua-se o seguinte teste:

$$\dot{y}_{\min} < \dot{y}(t) < \dot{y}_{\max} \quad (4.2)$$

onde  $\dot{y}(t)$  é a primeira derivada do sinal e  $\dot{y}_{\min}$ ,  $\dot{y}_{\max}$  são os limites que determinam a validade da variação do sinal.

A obtenção de um valor de  $y(t)$  ou de  $\dot{y}(t)$  fora dos respectivos intervalos de validade será indicador de uma possível falha, sendo enviado ao supervisor um resíduo indicativo dessa ocorrência.

Os limites usados podem ser fixos ou obtidos por um método adaptativo, procurando, neste caso, obter sensibilidade ao modo de funcionamento do processo e assim, reduzir a possibilidade de obter falsos alarmes.

Complementarmente, a consideração de modelos de regressão polinomiais e a estimação recursiva dos parâmetros desse modelo, por exemplo, pelo método dos mínimos quadrados, permite obter uma predição do sinal  $y(t)$  e, assim, efectuar uma validação mais eficaz.

### 4.2.2 Nível de Execução

O nível intermédio da arquitectura, corresponde ao nível de execução e inclui os módulos de observação, de diagnóstico, executor, de reconfiguração e o sistema de controlo.

O primeiro efectua a estimação dos parâmetros,  $\hat{\theta}$ , e das variáveis,  $\hat{x}$ , que caracterizam o processo. Esta estimação pode ser concretizada por aplicação de diversas metodologias, sendo neste caso considerado o projecto de observadores de Luenberger (Luenberger, 1966; 1971).

Com base nos dados disponíveis sobre o processo (saídas medidas e variáveis estimadas), o módulo de diagnóstico efectua a detecção e o isolamento de falhas, gerando resíduos representativos das falhas para que possam ser identificadas e, em consequência, disponibilizar a informação necessária para que o supervisor gere as acções adequadas à sua acomodação. A metodologia proposta considera o projecto integrado deste módulo e do controlador, obtendo-se um controlador generalizado cujas saídas incluem as acções de controlo e os resíduos.

Relativamente ao sistema de controlo, assumindo que o processo é representado por um conjunto de modelos lineares com incerteza, é constituído por um conjunto de controladores projectados com o objectivo de gerar a acção de controlo,  $u_C$ , capaz de assegurar de uma forma robusta os requisitos de estabilidade, de desempenho e de tolerância passiva a falhas, para cada um dos modelos considerados. Este sistema inclui ainda um controlador para a realização, em segurança, de uma operação de paragem do funcionamento do processo e um controlador cuja saída é determinada manualmente pelo supervisor humano.

Integrado neste nível considera-se um módulo de reconfiguração que é colocado entre o sistema de controlo e o processo e cuja tarefa principal consiste na transformação da estrutura de controlo para gerar novos sinais de controlo e/ou novos sinais de saída,  $y_{rec}$ , através de sensores e actuadores virtuais. A metodologia considerada para o projecto destes elementos virtuais procura explorar a existência de redundância física e/ou analítica do processo. Para que a metodologia seja aplicável de uma forma automática, os modelos usados para a representação do processo devem incluir todas as variáveis mensuráveis e todos os elementos de actuação existentes no processo, mesmo que não sejam utilizados nos modos de funcionamento nominais.

Ainda dentro deste nível inclui-se um módulo executor que tem como objectivo a concretização de acções resultantes da decisão recebida do supervisor. Estas incluem a selecção do controlador,  $\sigma_C$ , o sinal correspondente à saída do processo,  $y_C$ , e a acções correctivas necessárias à reconfiguração do sistema. O executor, baseado num mecanismo lógico de comutação, dispõe também dos sinais gerados pelos sensores, pelo sensor virtual do módulo de reconfiguração e pelo estimador.

### 4.2.3 Nível de Supervisão

No nível de supervisão, o supervisor usa a informação relativa às entradas e às saídas do processo para identificar o modo de funcionamento do processo e a informação relativa ao diagnóstico de falhas e à validação dos sinais dos sensores para identificar as situações de falha. Este sistema é constituído, basicamente por um mecanismo lógico de decisão que, conjugando a informação sobre o modo de funcionamento, sobre a situação de falha e a fornecida pelo supervisor humano, gera as decisões necessárias para garantir a estabilidade, o desempenho e a tolerância a falhas do sistema em malha fechada.

Ainda neste nível, inclui-se o módulo de identificação de falhas que, usando os resíduos resultantes da detecção e isolamento de falhas e da validação das saídas medidas, efectua a sua identificação e produz a informação necessária à localização do componente em falha e à avaliação do grau de severidade da falha.

Para estabelecer a interface com o supervisor humano, o sistema de supervisão recebe deste, a indicação sobre a operação em modo automático ou manual, os sinais de referência representativos dos objectivos para o sistema em malha fechada (habitualmente, a trajectória desejada para os sinais de saída do processo) e as acções de controlo a enviar ao processo na situação em que o sistema se encontra no modo de operação manual. Caso seja definido o modo de operação manual, o supervisor envia ao sistema de controlo as acções de controlo designadas manualmente pelo supervisor humano. No modo automático, o supervisor valida as referências introduzidas, igualmente, pelo supervisor humano, modificando-as sempre que estas não sejam alcançáveis pelo sistema em malha fechada (por exemplo, numa situação de falha num actuador ou num parâmetro do processo). A tarefa principal do supervisor consiste na geração do sinal de decisão a enviar ao executor para que os objectivos definidos para o sistema em malha fechada sejam concretizados. Além disso, o supervisor fornece ao supervisor humano os dados do sistema global (incluindo, por exemplo, as entradas, as saídas e os parâmetros do processo), a informação sobre o modo de funcionamento do sistema e os sinais de alarme, representativos das situações de falha detectadas e identificadas pelo supervisor.

## 4.3 Reconfiguração do Sistema

Quando ocorrem falhas com um grau de severidade elevado que provoquem, por exemplo, a avaria de um actuador ou de um sensor, verifica-se a quebra da malha de controlo em malha fechada com o controlador nominal, projectado para o modo de funcionamento nominal (sem falha) do processo. Para que o sistema continue a funcionar é necessário considerar um conjunto diferente de sinais de entrada e saída (ver Figura 4.2) que torne possível a tarefa de controlo do sistema em malha fechada.



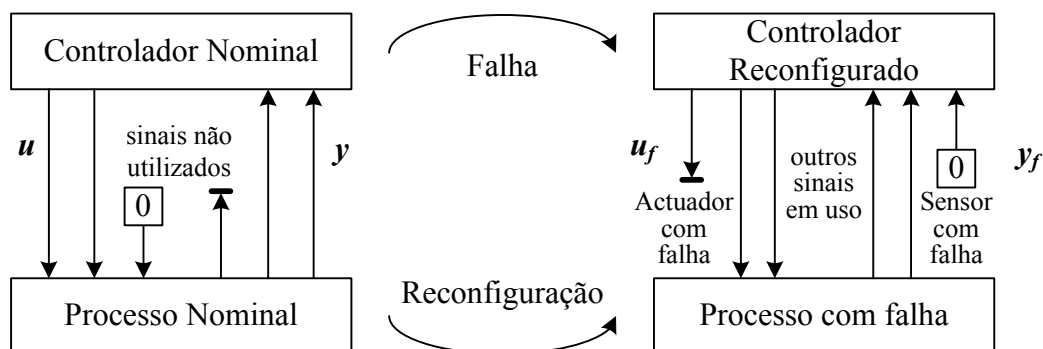


Figura 4.2: Reconfiguração do controlador em resposta a falhas.

Para que seja possível efectuar a reconfiguração assume-se a existência de componentes (actuadores e/ou sensores) redundantes no processo, ou seja, considera-se que existem variáveis de entrada e de saída do processo para além daquelas que são usadas pelo controlador nominal. Assim, para que a tarefa de reconfiguração seja executada de uma forma eficaz, é conveniente que a representação do processo inclua todas as possibilidades de configuração. Isto significa que a entrada  $u$  deve incluir todas as variáveis de actuação e a saída  $y$  todas as variáveis que é possível medir. Os sinais de entrada e de saída adicionais constituem a redundância e as alternativas para a malha de controlo necessárias à efectivação da reconfiguração.

Deste modo, o objectivo da tarefa de reconfiguração é a transformação da estrutura de controlo de forma a usar os sinais adicionais, mantendo a estabilidade do processo com a falha e a sua operacionalidade com um desempenho aceitável. A operação de reconfiguração pode incluir a desactivação de actuadores e/ou sensores caso o seu contributo para a operacionalidade do sistema não seja efectivo.

### 4.3.1 Módulo de Reconfiguração

Uma possibilidade para a reconfiguração do controlador consiste na comutação para outro controlador, previamente projectado para a situação de falha. No entanto, a abordagem proposta considera a introdução de um módulo de reconfiguração mantendo, sempre que possível, o controlador nominal. Neste caso, o controlador reconfigurado é formado pelo controlador nominal e pelo bloco de reconfiguração.

Na Figura 4.3 representa-se a estrutura proposta para a reconfiguração da malha de controlo. Com esta configuração pretende-se adaptar o processo com falha ao controlador nominal em vez de adaptar o controlador ao processo. Desta forma, espera-se que o agrupamento do processo com o bloco de reconfiguração (processo reconfigurado) produza, para uma dada entrada  $u_C$ , uma saída  $y_C$  análoga à do processo nominal.

Esta abordagem pretende que a interface entre o controlador nominal e o processo reconfigurado não seja modificada, reduzindo as alterações na malha de controlo.

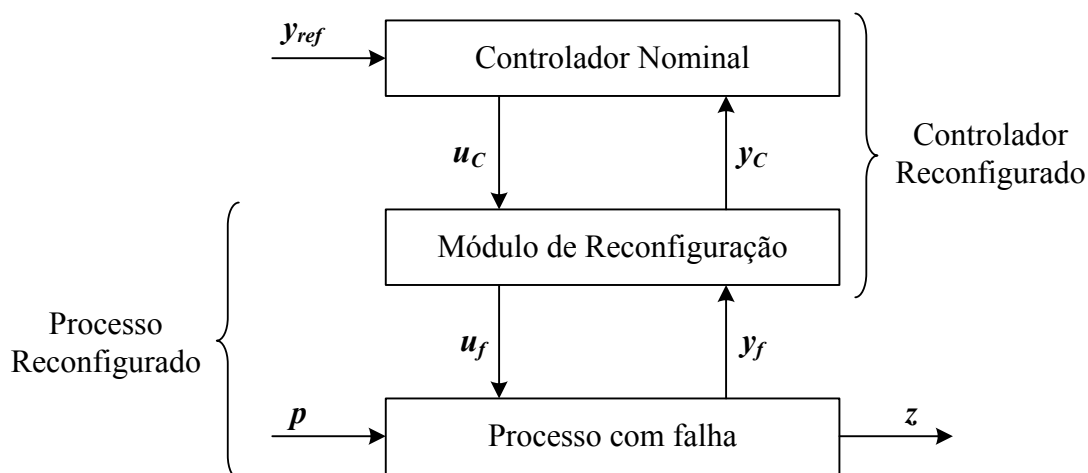


Figura 4.3: Reconfiguração da malha de controlo para falhas nos actuadores ou nos sensores.

No caso de avaria em sensores, o bloco de reconfiguração baseia-se na aplicação de observadores de Luenberger para reconstruir a saída com falha. Este bloco é denominado sensor virtual porque reconstrói o elemento  $y_i$  do vector de saída  $y_f$  a partir dos restantes sinais medidos.

Se a falha ocorrer num actuador, o bloco de reconfiguração é obtido por uma metodologia dual. Pretende-se que o bloco, denominado actuador virtual, actue de forma semelhante ao actuador antes da falha ocorrer, alterando adequadamente os sinais de controlo enviados aos outros actuadores e, assim, substituir a acção do actuador com falha.

### 4.3.2 Definição do Problema de Reconfiguração

O problema de reconfiguração considera que o processo é representado por um modelo linear. Como, usualmente, os processos são não lineares, obtém-se por modelização analítica ou experimental o seguinte modelo não linear do processo:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= f(x, u, p) \\
 y &= g(x) \\
 z &= h(x) \\
 x(0) &= x_0
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

onde  $x \in \mathcal{R}^{n_x}$  são os estados do processo,  $x_0 \in \mathcal{R}^{n_x}$  os respectivos valores iniciais,  $u \in \mathcal{R}^{n_u}$  as entradas de controlo,  $y \in \mathcal{R}^{n_y}$  as saídas mensuráveis,  $p \in \mathcal{R}^{n_p}$  uma perturbação na entrada e  $z \in \mathcal{R}^{n_z}$  uma saída externa, usada para avaliar o desempenho do sistema independentemente das falhas que afectam a saída.

Efectuando uma linearização do modelo para um dado modo de funcionamento nominal, obtém-se a seguinte representação no espaço de estados:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu + B_p p \\ y &= Cx \\ z &= C_z x \\ x(0) &= x_0\end{aligned}\tag{4.4}$$

onde  $A \in \mathcal{R}^{n_x \times n_x}$ ,  $B \in \mathcal{R}^{n_x \times n_u}$ ,  $B_p \in \mathcal{R}^{n_x \times n_p}$ ,  $C \in \mathcal{R}^{n_y \times n_x}$  e  $C_z \in \mathcal{R}^{n_z \times n_x}$ .

Como foi referido anteriormente é importante que este modelo inclua todos os sinais de entrada e de saída, incluindo aqueles que não são usados directamente pelo controlador nominal. A Figura 4.4 apresenta uma representação do processo nominal.

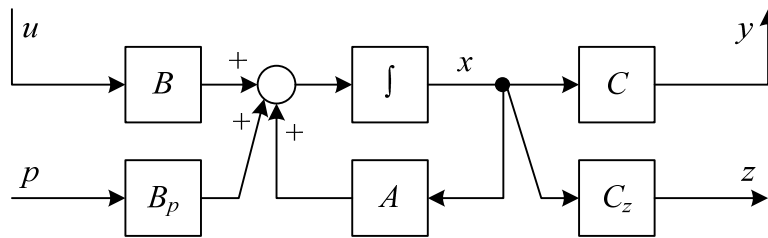


Figura 4.4: Representação linear do processo nominal.

Para controlar o processo nominal considera-se um controlador cuja saída correspondente ao sinal de actuação  $u_c$ , é obtida a partir dos sinais  $y_c$ , correspondentes às variáveis medidas do processo, e da referência  $ref$ . A metodologia proposta para a reconfiguração não impõe restrições às características dinâmicas do controlador.

No entanto, para simplificar a análise do sistema em malha fechada, considera-se um controlador linear  $K$  que estabelece a seguinte lei de controlo:

$$u_c = K(ref - y_c)\tag{4.5}$$

em que o controlador pode ser representado no espaço de estados por:

$$\begin{aligned}\dot{x}_c &= A_c x_c + B_c (ref - y_c) \\ u_c &= C_c x_c + D_c (ref - y_c) \\ x_c(0) &= 0\end{aligned}\tag{4.6}$$

No modo de funcionamento nominal, o controlador (4.6) é conectado directamente ao processo (4.4) com  $u = u_c$  e  $y_c = y$ , conforme a Figura 4.5.

Daqui resulta o sistema em malha fechada dado por:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} &= A_{mf} \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BD_c \\ B_c \end{bmatrix} ref + \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix} p \\ y &= Cx \\ z &= C_z x\end{aligned}\tag{4.7}$$

em que a matriz de estado  $A_{mf}$  é definida como:

$$A_{mf} = \begin{bmatrix} A - BD_cC & BC_c \\ -B_cC & A_c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Os pólos do sistema em malha fechada são dados pelos valores próprios de  $A_{mf}$ ,  $\lambda(A_{mf})$ . Assume-se que o sistema em malha fechada com este controlador assegura a estabilidade do sistema e satisfaz os requisitos de desempenho relativamente ao seguimento da trajectória da referência  $ref$  e à rejeição da perturbação  $p$ .

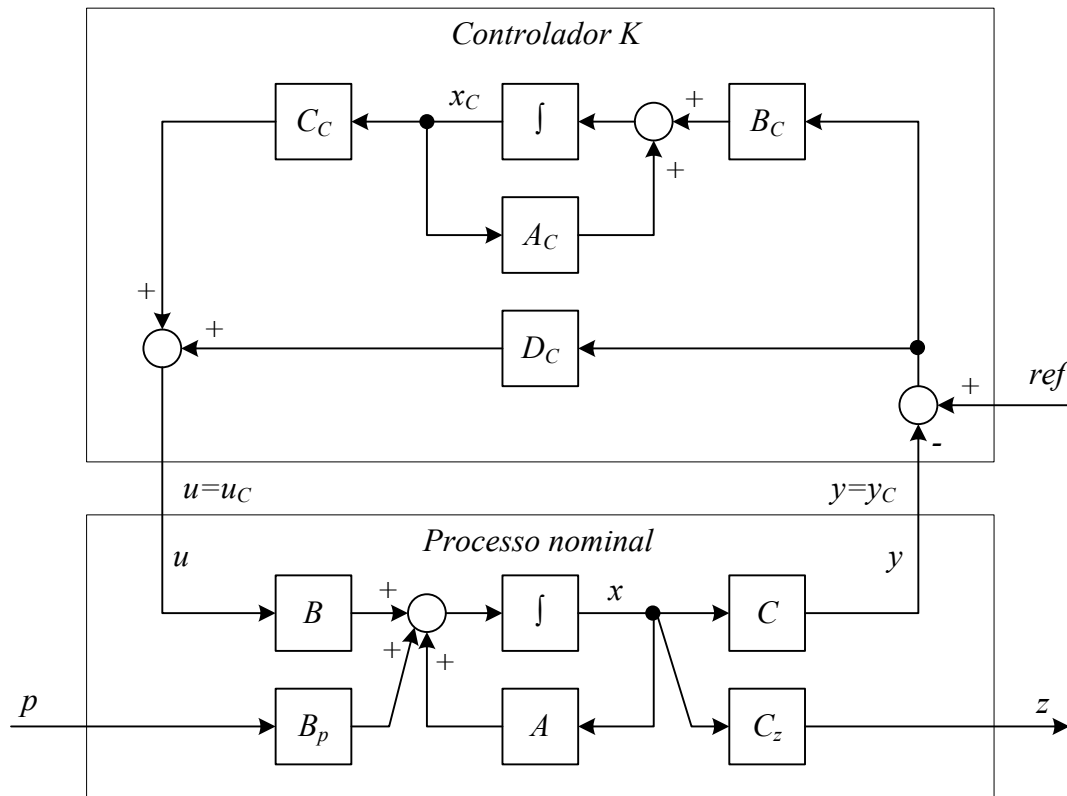


Figura 4.5: Representação do sistema nominal em malha fechada.

### 4.3.3 Falhas e Reconfiguração

Para representar o processo numa situação de falha, considera-se o modelo linear (4.4) substituindo as matrizes  $A$ ,  $B$  e  $C$  pelas matrizes  $A_f$ ,  $B_f$ ,  $C_f$ , representando os efeitos das falhas previstas nos sensores, nos actuadores e nos componentes do processo. Assume-se que as matrizes  $B_p$  e  $C_z$  se mantêm inalteradas, assim como o estado inicial do processo.

A correspondente representação no espaço de estados é dada por:

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= A_f x_f + B_f u_f + B_p p \\ y_f &= C_f x_f \\ z_f &= C_z x_f \\ x_f(0) &= x_0 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Para representar a situação em que o sensor correspondente à saída  $y_i$  avaria devido a uma falha, a linha  $i$  da matriz  $C$  é colocada a zero, obtendo-se uma nova matriz  $C_f$ . No caso do actuador correspondente à entrada de controlo  $u_j$  falhar completamente, a coluna  $j$  da matriz  $B$  é colocada a zero, resultando na matriz  $B_f$ .

Desta forma, o número de sinais de entrada, de saída e de variáveis de estado do modelo não é alterado, apesar de alguns terem perdido a sua funcionalidade devido à ocorrência de falha. Além disso, é assumido que o processo com falha continua a ser estabilizável usando as acções de controlo  $u_f$  e detectável usando as saídas  $y_f$ . Isto significa que todos os modos instáveis são observáveis e controláveis e que existe um controlador que estabiliza o processo em malha fechada. Caso os requisitos de observabilidade e de controlabilidade não sejam satisfeitos, é necessário obter a parte do processo que seja completamente observável e controlável.

O objectivo da reconfiguração consiste em encontrar uma plataforma de controlo que garanta, em caso de falha, a estabilidade, a regulação, o seguimento da trajectória de referência e a atenuação dos efeitos de perturbações para o sistema em malha fechada.

Este objectivo pode ser traduzido pelo seguinte requisito:

**Requisito de Reconfiguração:** Este requisito contempla uma parte estática e outra dinâmica. Na primeira, pretende-se que a saída  $z_f$  da malha de reconfiguração se aproxime assintoticamente para os valores da saída  $z$  do sistema nominal. Isto significa que, quando os sinais de referência  $ref$  e de perturbação  $p$  são constantes, a seguinte condição deve ser verificada:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (z_f(t) - z(t)) = 0.$$

Sendo o comportamento transitório determinado pelos pólos e zeros do sistema, este não deve diferir significativamente no modo nominal e no modo reconfigurado. A introdução de pólos ou zeros adicionais só é aceitável se apresentarem um comportamento dinâmico suficientemente rápido para não afectar o comportamento dominante do sistema.

De referir que este requisito pode ser ainda mais exigente, impondo que o sistema com o controlador reconfigurado apresente exactamente o mesmo comportamento do sistema nominal, ou seja que  $z_f(t) = z(t)$  para qualquer sinal de referência, perturbação ou condição inicial. No entanto, como este requisito só pode ser assegurado em casos muito especiais, não será considerado neste trabalho.

### 4.3.4 Sensor Virtual

Quando é identificada uma falha no sensor associado à saída  $y_i$ , a matriz  $C$  é alterada pelo supervisor, obtendo-se a matriz  $C_f$  com a linha  $i$  a zero. O sistema com falha num sensor vem então descrito por:

$$\begin{aligned}\dot{x}_f &= Ax_f + Bu_f + B_p p \\ y_f &= C_f x_f \\ z_f &= C_z x_f \\ x_f(0) &= x_0\end{aligned}\tag{4.10}$$

Em caso de falha em sensores, a reconstrução de todas as saídas do sistema,  $y$ , a partir das saídas disponíveis,  $y_f$ , só poderá acontecer se a seguinte condição se verificar:

$$\text{Kern}(C_f) \subseteq \text{Kern}(C)\tag{4.11}$$

onde  $\text{Kern}(\cdot)$  designa a função *kernel* de uma matriz, que quando aplicada à matriz  $C$ , obtém o conjunto de vectores  $x$  que verificam a condição  $Cx = 0$ .

**Lema 4.1:** *No caso de falhas em sensores, o conjunto das saídas só pode ser reconstruído se a relação (4.11) se verificar. Nesse caso, o controlador:*

$$u = -KLy\tag{4.12}$$

*é uma solução para o problema de reconfiguração, em que  $L$  satisfaz a relação:*

$$C = LC_f\tag{4.13}$$

O controlador reconfigurado, dado por  $K_f = KL$ , permite satisfazer o requisito de reconfiguração.

Tipicamente, a condição (4.11) é satisfeita nas seguintes condições:

- i) A falha alterou a sensibilidade do sensor, mas o sinal não foi completamente perdido, ou seja, verifica-se  $y_f = ay$  para um dado escalar  $a$ .
- ii) Existe redundância física para o sensor em falha. Neste caso, a matriz  $L$  comuta a saída para o sensor redundante.
- iii) Existindo uma relação analítica entre a saída em falha e as restantes saídas disponíveis, a matriz  $L$  usa essa relação para reconstruir essa saída.

Assumindo que o Lema 4.1 se verifica, a nova estrutura de controlo pode ser traduzida pelo controlador nominal e por um bloco de reconfiguração estático, definido por:

$$\begin{aligned} y_C &= Ly_f \\ u_f &= u_C \end{aligned} \quad (4.14)$$

Numa situação geral, em que a condição (4.11) não se verifique, o sensor virtual é representado por um observador, definido pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu_f + L(y_f - C_f\hat{x}) \\ y_C &= C\hat{x} \\ u_C &= u_f \\ \hat{x}(0) &= \hat{x}_0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

onde  $\hat{x}$  representa o estado do observador e  $L$  é a matriz a projectar.

A partir do estado observado, a saída do sistema pode ser determinada por  $y = C\hat{x}$ . Dado que a resposta dos sinais observados às perturbações é mais lenta do que a resposta do sensor, é conveniente usar, sempre que possível, a informação dos restantes sensores e observar apenas a diferença entre a saída nominal e a saída em falha. Esta abordagem pode ser generalizada usando a seguinte equação:

$$y_C = Sy_f + (C - SC_f)\hat{x} \quad (4.16)$$

Onde a matriz  $S$  é um parâmetro de projecto. Em particular, para  $S = 0$  só se usam os valores observados e, para  $S = I$ , os restantes sensores são usados sempre que seja possível.

Deste modo, considerando o erro de observação dado por  $e = \hat{x} - x_f$ , o modelo do processo reconfigurado, constituído pelo processo e pelo sensor virtual, resulta na seguinte representação:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{e} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A - LC_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u_C + \begin{bmatrix} B_p \\ -B_p \end{bmatrix} p \\ y_C &= \begin{bmatrix} C & C - SC_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ e \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_f(0) \\ e(0) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_{f0} \\ \hat{x}_0 - x_{f0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Para analisar o comportamento do sistema em malha fechada (ver Figura 4.6) considera-se a combinação do processo reconfigurado (4.17) com o controlador (4.6).

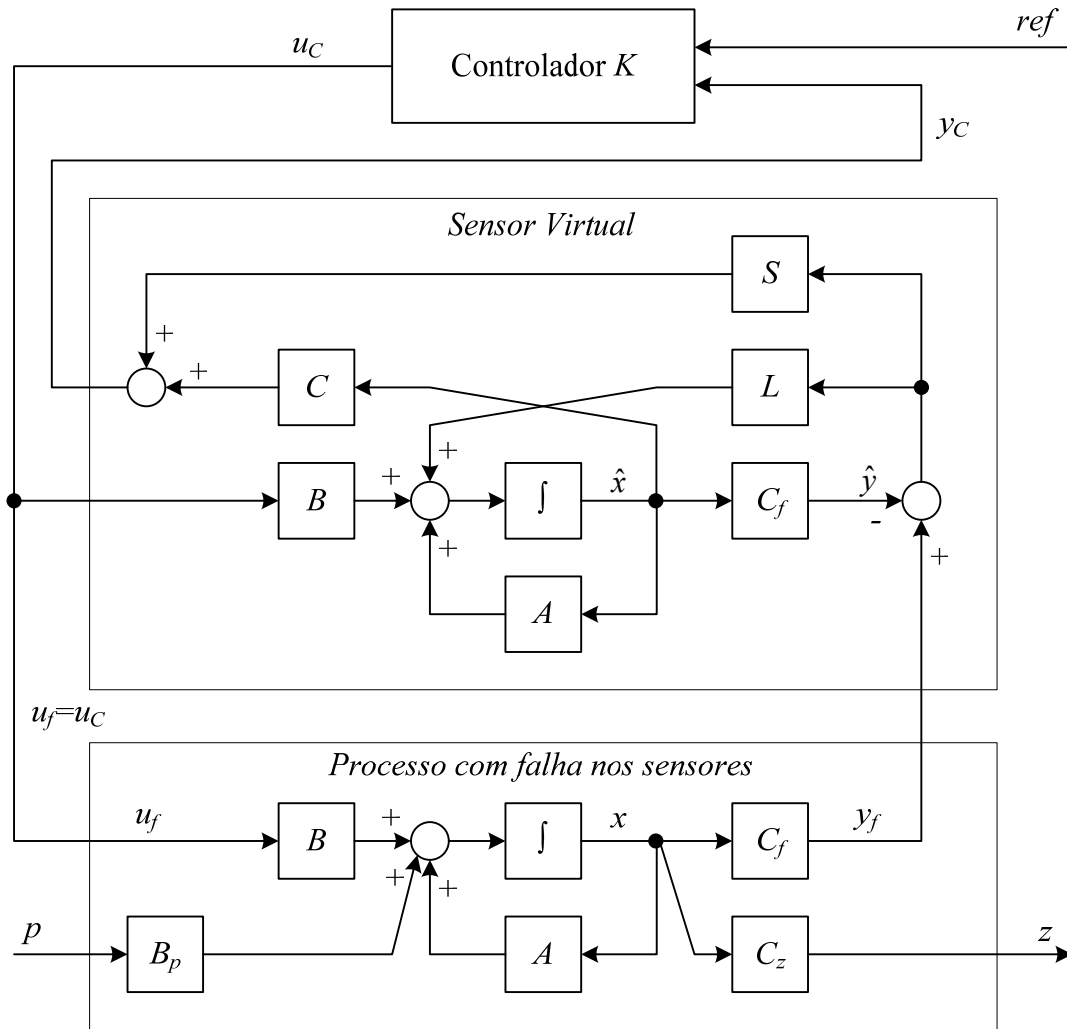


Figura 4.6: Reconfiguração usando um sensor virtual.

Desta combinação resulta a seguinte representação:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{e} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A - BKC & BK(SC_f - C) \\ 0 & A - LC_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_p \\ -B_p \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} BK \\ 0 \end{bmatrix} ref \\
 y_C &= \begin{bmatrix} C & C - SC_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ e \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} x_f(0) \\ e(0) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_{f0} \\ \hat{x}_0 - x_{f0} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

A trajectória do sistema depende do estado inicial  $x_0$ , do sinal de referência  $ref$  e da perturbação  $p$ . Dado que se assume que o sistema é representado por um modelo linear, pode-se aplicar o princípio da sobreposição e o comportamento do sistema para cada uma das três situações pode ser analisado separadamente.



Assim, para o caso de regulação,  $ref = 0$  e  $p = 0$ , o sistema (4.18) vem simplificado na forma:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{e} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A-BKC & BK(SC_f - C) \\ 0 & A-LC_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ e \end{bmatrix} \\ y_c &= \begin{bmatrix} C & C-SC_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ e \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_f(0) \\ e(0) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_{f0} \\ \hat{x}_0 - x_{f0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Daqui pode-se concluir que o controlador  $K$  influencia o comportamento do estado do processo  $x_f$  através da matriz  $A-BKC$  (projecto do controlador) enquanto  $L$  afecta a dinâmica do erro de observação e através da matriz  $A-LC_f$  (projecto do observador). Verificando-se a influência cruzada do erro  $e$  no estado  $x_f$ , a escolha adequada de  $S$  permitirá reduzir essa influência. A estabilidade do sistema em malha fechada é garantida desde que a malha de controlo (determinada por  $K$ ) seja estável e o observador (determinado por  $L$ ) também for estável. Esta condição pode ser satisfeita pela escolha apropriada de  $L$ , pois é assumido que o par  $(A, C_f)$  é observável.

Para o requisito de seguimento da trajectória de referência  $ref$ , considera-se  $x_{f0} = \hat{x}_0 = 0$  e  $p = 0$ , obtendo-se a seguinte representação:

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= (A-BKC)x_f + BKref \\ y_c &= Cx_f \\ x_f(0) &= 0 \end{aligned} \quad (4.20)$$

Como o comportamento dinâmico do sistema neste caso é idêntico ao do sistema nominal em malha fechada, considera-se que este requisito é satisfeito.

Para analisar o efeito da perturbação, assume-se que o estado inicial e o sinal de referência são nulos. O sistema em malha fechada neste caso é dado por:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{e} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A-BKC & BK(SC_f - C) \\ 0 & A-LC_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_p \\ -B_p \end{bmatrix} p \\ y_c &= \begin{bmatrix} C & C-SC_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ e \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_f(0) \\ e(0) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Neste caso, como a perturbação  $p$  influencia directamente o erro de observação e o estado do sistema, o comportamento dinâmico do sistema reconfigurado vai ser diferente do comportamento do sistema nominal. Deste modo, este requisito poderá não ser garantido pelo controlador reconfigurado.

### 4.3.5 Actuador Virtual

No caso de ser identificada uma falha no actuador associado à entrada  $u_j$ , a matriz  $B$  é alterada pelo supervisor, obtendo-se a matriz  $B_f$  com a coluna  $j$  a zero. Para encontrar uma solução para o problema de reconfiguração, no caso de existirem falhas nos actuadores, considera-se um actuador virtual como sistema dual do sensor virtual, apresentado na secção anterior.

O sistema com falhas nos actuadores será então descrito por:

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= Ax_f + B_f u_f + B_p p \\ y_f &= Cx_f \\ z_f &= C_z x_f \\ x_f(0) &= x_0 \end{aligned} \quad (4.22)$$

A possibilidade de utilizar um bloco de reconfiguração estático para dar resposta à falha num actuador está dependente da verificação da seguinte condição:

$$\text{Im}(B_f) \supseteq \text{Im}(B) \quad (4.23)$$

onde  $\text{Im}(\cdot)$  designa a imagem de uma matriz, que quando aplicada a uma matriz  $B$ , obtém o conjunto de vectores  $y$  para os quais existe um vector  $x$  tal que  $y = Bx$  se verifica.

**Lema 4.2:** *No caso de falhas nos actuadores, a reposição da totalidade das acções de controlo só é possível se a relação (4.23) se verificar. Nesse caso, o controlador:*

$$u = -MKy \quad (4.24)$$

*é uma solução para o problema de reconfiguração, em que  $M$  satisfaz a relação:*

$$B_f M = B \quad (4.25)$$

Nestas condições, o controlador reconfigurado, dado por  $K_f = MK$ , permite satisfazer o requisito de reconfiguração.

Assumindo que o Lema 4.2 se verifica, a nova estrutura de controlo pode ser traduzida pelo controlador nominal e por um bloco de reconfiguração estático definido por:

$$\begin{aligned} u_f &= Mu_c \\ y_c &= y_f \end{aligned} \quad (4.26)$$

No caso geral, em que a condição (4.23) não se verifica, considera-se um actuador virtual com uma estrutura dual da utilizada no sensor virtual, conforme a Figura 4.7.

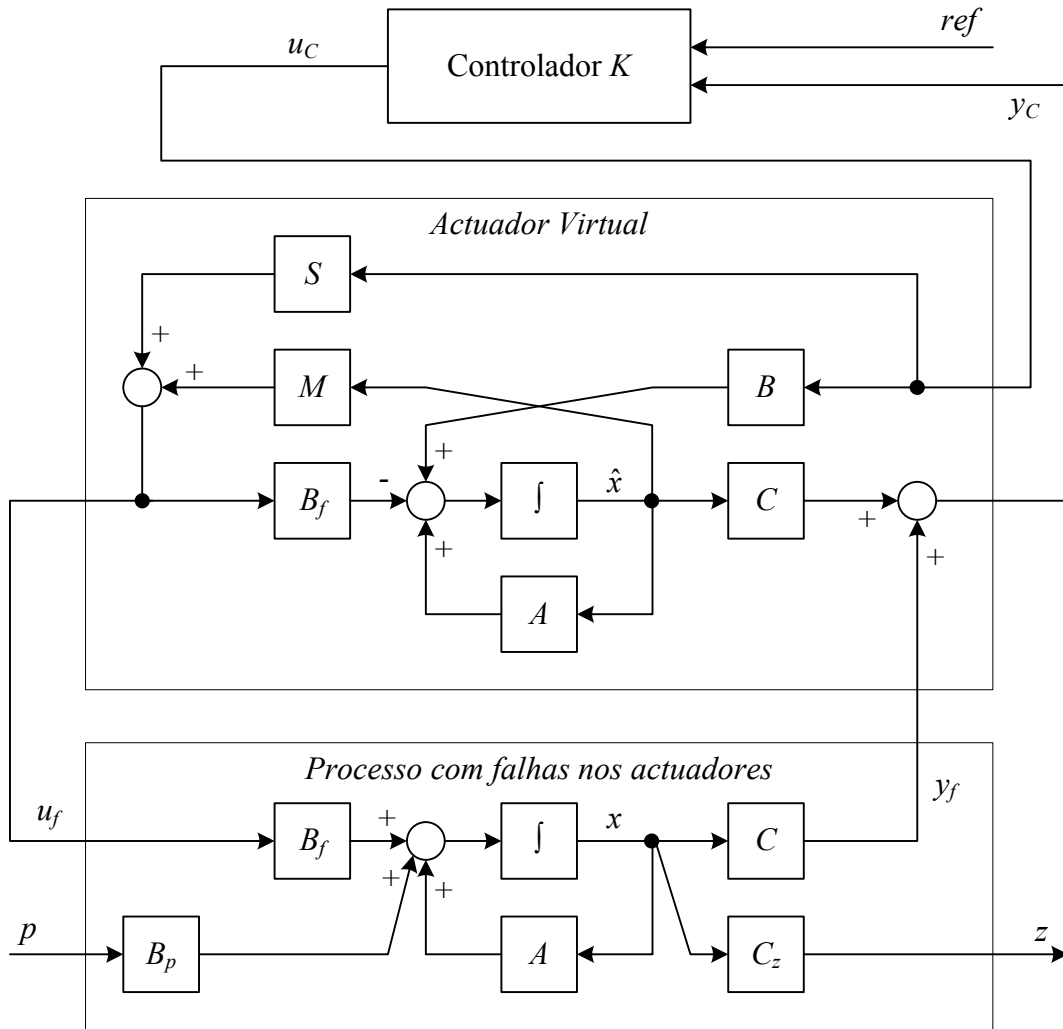


Figura 4.7: Reconfiguração usando um actuador virtual.

De acordo com esta estrutura o actuador virtual é definido pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} - B_f u_f + B u_C \\
 y_C &= y_f + C\hat{x} \\
 u_f &= M\hat{x} + S u_C \\
 \hat{x}(0) &= \hat{x}_0
 \end{aligned}
 \tag{4.27}$$

onde as matrizes  $M$  e  $S$  constituem os elementos a projectar.

O modelo do processo reconfigurado, constituído pelo processo e pelo actuador virtual, resulta na seguinte representação:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & B_f M \\ 0 & A - B_f M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ \hat{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_f S \\ B - B_f S \end{bmatrix} u_C + \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix} p \\
 y_C &= [C \quad C] \begin{bmatrix} x_f \\ \hat{x} \end{bmatrix} \quad z = [C_z \quad 0] \begin{bmatrix} x_f \\ \hat{x} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_f(0) \\ \hat{x}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{f0} \\ \hat{x}_0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{4.28}$$

Para analisar o comportamento do sistema em malha fechada introduz-se um novo estado  $\tilde{x} = x_f + \hat{x}$ , obtendo-se a nova representação:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A - B_f M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ B - B_f S \end{bmatrix} u_c + \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix} p \\ y_c &= [C \quad 0] \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \\ z &= [C_z \quad -C_z] \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \tilde{x}(0) \\ \hat{x}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{f0} + \hat{x}_0 \\ \hat{x}_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.29)$$

De notar que o novo estado  $\tilde{x}$  tem um comportamento semelhante ao do estado do processo original. A reconfiguração será possível desde que o estado  $\hat{x}$  seja estável e apresente valores reduzidos.

Considerando um controlador  $K$ , obtém-se a seguinte representação para o sistema em malha fechada:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A - BKC & 0 \\ (B_f S - B)KC & A - B_f M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BK \\ (B - B_f S)K \end{bmatrix} ref + \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix} p \\ y_c &= [C \quad 0] \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \\ z &= [C_z \quad -C_z] \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \tilde{x}(0) \\ \hat{x}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{f0} + \hat{x}_0 \\ \hat{x}_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Aplicando o princípio da sobreposição a este modelo linear, analisa-se o comportamento do sistema para as situações de regulação, seguimento de trajectória de referência e de atenuação da perturbação.

Assim, para o caso de regulação,  $ref = 0$  e  $p = 0$ , o sistema (4.30) vem simplificado na forma:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A - BKC & 0 \\ (B_f S - B)KC & A - B_f M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \\ y_c &= [C \quad 0] \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \\ z &= [C_z \quad -C_z] \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \tilde{x}(0) \\ \hat{x}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{f0} + \hat{x}_0 \\ \hat{x}_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.31)$$

Nesta representação pode observar-se que o estado adicional do actuador virtual,  $\hat{x}$ , não influencia a saída reconfigurada  $y_C$ , mas afecta o estado do processo com falha  $e$ , assim, a saída externa  $z$ . Dado que a matriz de estado é diagonal inferior, o projecto do controlador  $K$  (determinando  $A-BKC$ ) e do compensador  $M$  (obtendo  $A-B_fM$ ) são independentes entre si. Caso o compensador  $M$  seja estável, as variáveis vão convergir para o seu valor nominal, realizando a reconfiguração com sucesso.

Para o requisito de seguimento da trajectória de referência  $ref$ , considera-se  $x_{f0} = \hat{x}_0 = 0$  e  $p = 0$ , obtendo-se a seguinte representação em malha fechada:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A-BKC & 0 \\ (B_fS-B)KC & A-B_fM \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BK \\ (B-B_fS)K \end{bmatrix} ref \\ y_C &= \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \\ z &= \begin{bmatrix} C_z & -C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \tilde{x}(0) \\ \hat{x}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.32)$$

Analisando este modelo, verifica-se que, no caso geral, o estado  $\hat{x}$  não irá convergir para zero. Haverá, portanto, uma diferença entre o estado do processo com falha  $x_f$  e o estado correspondente do processo nominal  $x$ . Embora esta diferença não seja visível em  $y_C$ , as saídas  $y_f$  e  $z$  serão afectadas. Desta forma, o equilíbrio do estado  $x_f$  do sistema reconfigurado poderá ser diferente do equilíbrio do estado  $x$  no caso nominal. Como o controlador não é sensível a esta diferença, a estabilidade do sistema não é afectada.

Para analisar o efeito da perturbação, assume-se que o estado inicial e o sinal de referência são nulos. O sistema em malha fechada neste caso é dado por:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A-BKC & 0 \\ (B_fS-B)KC & A-B_fM \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix} p \\ y_C &= \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \\ z &= \begin{bmatrix} C_z & -C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \tilde{x}(0) \\ \hat{x}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.33)$$

Dado que a perturbação  $p$  não afecta directamente o estado  $\hat{x}$ , verifica-se que a resposta do sistema a perturbações externas não é influenciada pelas falhas nem pela reconfiguração. Desta forma, o requisito de reconfiguração é satisfeito.

### 4.3.6 Análise das Abordagens

Comparando os blocos de reconfiguração apresentados nas secções anteriores, observa-se a dualidade das abordagens para as falhas nos sensores e nos actuadores. A correspondência de variáveis é definida na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dualidade das variáveis e dos parâmetros dos blocos de reconfiguração.

Sensor Virtual	$A$	$B$	$C$	$K$	$L$	$S$	$\hat{x}$	$u$	$y$
Actuador Virtual	$A'$	$C'$	$B'$	$K'$	$M'$	$S'$	$\tilde{x}$	$y$	$u$

De referir que a dualidade, para além da relação entre variáveis e matrizes, envolve também a inversão do sentido dos sinais, a comutação entre pontos de soma e de derivação e uma inversão do diagrama para preservar o sentido da malha de controlo.

Analisando as abordagens propostas, verificou-se que a introdução de um bloco de reconfiguração com um sensor virtual permitiu dar resposta a falhas em sensores, satisfazendo o requisito de reconfiguração, excepto no caso da existência de perturbações. De forma análoga, para o caso de falhas em actuadores, foi considerado um actuador virtual que também garante o requisito de reconfiguração com a excepção da situação de seguimento da trajectória de referência.

Uma possível solução para as duas situações indicadas, baseia-se na introdução do efeito integrador na estrutura do sensor e do actuador virtuais.

Relativamente à reconfiguração quando são identificadas falhas internas ao processo, é possível obter um bloco de reconfiguração que combine o sensor virtual com o actuador virtual, não sendo necessário introduzir uma nova abordagem.

## 4.4 Sistema de Supervisão

O sistema de supervisão usa a informação relativa às entradas e saídas do processo para identificar o seu modo de funcionamento e a informação de diagnóstico de falhas para identificar as situações de falha. Este sistema é, essencialmente, constituído por um mecanismo lógico de decisão que, conjugando a informação sobre o modo de funcionamento, sobre a situação de falha e a fornecida pelo supervisor humano, toma as decisões necessárias para garantir a estabilidade, o desempenho e a tolerância a falhas do sistema.

### 4.4.1 Mecanismo de Supervisão

Na formulação do problema assume-se que o comportamento dinâmico do processo se pode representar por um determinado número finito,  $n_m$ , de modos de funcionamento, nominais e com falhas,  $P_1, P_2, \dots, P_{n_m}$ . Para cada um deles, é obtido um modelo linear com incertezas,  $M_i$ . Considera-se também que, para cada um destes modelos, é possível projectar um controlador fixo,  $K_i$ . Na Figura 4.8 é representado o mecanismo principal de supervisão considerado.

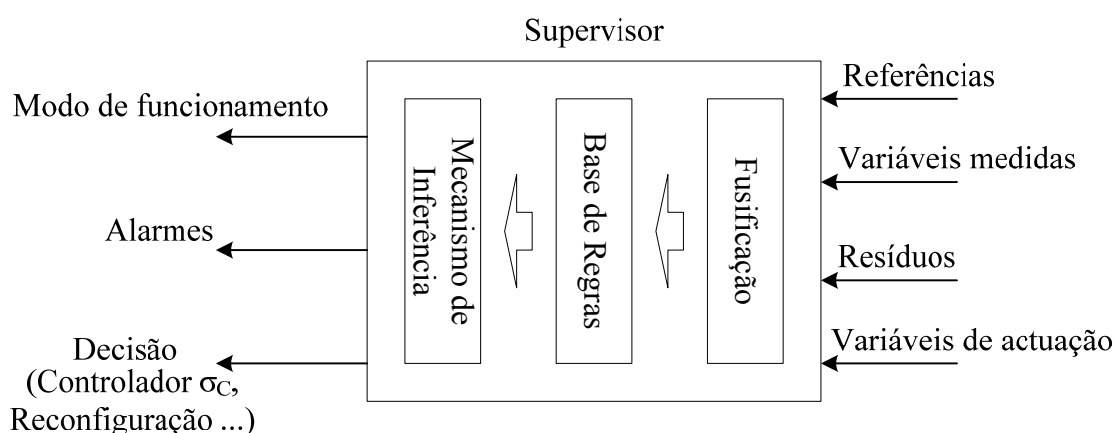


Figura 4.8: Mecanismo principal do supervisor.

A abordagem proposta considera um supervisor baseado em lógica difusa (Zadeh, 1965), constituído por três partes distintas: a fuzificação, a base de regras e o mecanismo de inferência (Lee, 1990). A primeira parte tem por função converter os valores numéricos de entrada em variáveis linguísticas. Estas variáveis permitem definir os modos de funcionamento do sistema em malha fechada. A base de regras define a estratégia para as várias decisões que o supervisor é chamado a tomar. Nestas incluem-se, por exemplo, a identificação do modo de funcionamento, a geração de alarmes indicativos da ocorrência de falhas, a ordem de reconfiguração do sistema e a selecção do controlador a usar.

As decisões do supervisor são obtidas através do mecanismo de inferência que opera com base nas regras activas em cada instante.

### 4.4.2 Supervisão com Lógica Difusa

A escolha das funções de pertença que permitem definir as variáveis linguísticas é, normalmente, baseada na informação sobre as características dinâmicas do processo, os seus modos de funcionamento nominais e em falha e nas indicações do supervisor humano.

O universo de discurso associado a cada variável é determinado pela gama de valores esperados. Deste modo, o conjunto difuso  $SV$  associado a uma variável  $V$  com um universo de discurso  $U_V$ , é definido através do seguinte conjunto de pares ordenados:

$$SV = \left\{ \left( V, \mu_{U_V}(V) \right) : V \in U_V \right\}. \quad (4.34)$$

A base de regras, que estabelece a estratégia do supervisor para a tomada de decisão, deve ser definida de forma a descrever todos os modos de funcionamento do sistema (nominais e em falha).

De uma forma genérica, um sistema difuso do tipo Takagi-Sugeno (Takagi and Sugeno, 1985) pode ser descrito através de um conjunto de regras na forma:

$$\text{Regra } i: \text{ IF } (x \text{ é } X) \text{ AND } (y \text{ é } Y) \text{ THEN } z = \varphi(x, y) \quad (4.35)$$

onde  $X$  e  $Y$  são conjuntos difusos e  $\varphi$  é uma função genérica, possivelmente não-linear, que calcula o valor da saída do supervisor  $z$ .

Usando esta formulação, a base de regras pode ser constituída através de  $n_{reg}$  regras do tipo:

$$\text{Regra } i: \text{ IF } (V_1 \text{ é } SV_1^{(i)}) \text{ AND } (V_2 \text{ é } SV_2^{(i)}) \text{ THEN } \alpha_i = \mu_{U_{V_1}}^{(i)}(V_1) \times \mu_{U_{V_2}}^{(i)}(V_2) \quad (4.36)$$

em que  $i$  corresponde ao número de regras,  $SV_1^{(i)}$  e  $SV_2^{(i)}$  definem, respectivamente, os valores linguísticos das variáveis  $V_1$  (definida no universo de discurso  $U_{V_1}$ ) e  $V_2$  (definida no universo de discurso  $U_{V_2}$ ) para a regra  $i$ , sendo  $\mu_{U_{V_1}}^{(i)}(V_1)$  e  $\mu_{U_{V_2}}^{(i)}(V_2)$  os respectivos graus de pertença.

A tomada de decisão é determinada pela agregação dos consequentes das regras, obtendo-se o índice  $i$ , tal que  $\alpha_i = \max \{ \alpha_1, \dots, \alpha_{n_{reg}} \}$ . Para dar resposta a situações em que mais que um índice é seleccionado, estabelece-se uma ordenação das variáveis por grau de prioridade. Deste modo, a escolha recairá no índice com o valor de pertença superior na variável com maior prioridade.

### 4.4.3 Simplificação do Supervisor

Em sistemas com várias variáveis de entrada, a representação do supervisor por um sistema difuso pode originar um número muito elevado de regras. Para simplificar o supervisor consideram-se, geralmente, técnicas de agrupamento (*clustering*).

Estas técnicas consistem, essencialmente, na classificação de um dado conjunto de dados  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  em grupos homogéneos  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_M\}$ , em que  $1 \leq M \leq N$  (se  $M = 1$ , todos os dados pertencem à mesma classe e se  $M = N$ , cada amostra define uma classe).



A técnica de agrupamento considerada, utiliza o algoritmo *c-Means clustering* (Bezdek, 1981) que minimiza a distância Euclidiana entre cada amostra e o centro dos  $M$  grupos (*clusters*) adoptados. A escolha do número de grupos  $M$  é um parâmetro de projecto que deve reflectir o grau de conhecimento existente sobre o sistema e a necessidade de manter a tomada de decisão num nível adequado à operacionalidade (estabilidade, desempenho...) do sistema supervisionado.

#### 4.4.4 Validação da Referência

O sistema de supervisão, além de tomar as decisões indicadas nas secções anteriores, também deve efectuar a validação dos sinais de referência, indicados pelo supervisor humano. Esta tarefa enquadra-se no objectivo geral de garantir a satisfação dos requisitos de segurança, de estabilidade e de desempenho do processo. Deste modo, esta operação tem como principal finalidade adequar a referência às condições do processo, determinadas pelas suas características físicas e pelo seu modo de funcionamento.

O método proposto para a validação baseia-se, essencialmente, na definição de limites mínimos e máximos para os sinais de referência associados a cada saída do processo. À partida, estes limites correspondem à delimitação do intervalo de valores que a respectiva saída pode assumir, tendo em conta as características físicas do processo (por exemplo, o valor pretendido para o nível de líquido num tanque está limitado pelas dimensões físicas do tanque).

Tendo em consideração o modo de funcionamento do processo, podem ser definidas novas restrições à gama de valores que a referência associada a uma dada saída pode tomar. Em particular, quando se identifica uma falha num actuador ou num parâmetro do processo, o comportamento dinâmico e estático do processo pode alterar-se e, desta forma, impor novas condicionantes ao funcionamento do processo. Como exemplo, refira-se a situação em que uma obstrução parcial numa tubagem de transporte de líquidos entre dois depósitos limita o caudal de transferência a valores inferiores aos que inicialmente seriam previstos.

Dado que o estabelecimento dos referidos limites depende, essencialmente, do comportamento do sistema em regime estacionário, a metodologia proposta baseia-se na definição dos ganhos estáticos entre as saídas e as entradas activas, a partir do modelo linear que caracteriza o processo em cada modo de funcionamento.

Assim, conhecendo o intervalo de valores que cada elemento activo de actuação pode assumir e a matriz de ganhos em regime estacionário do processo, estabelecem-se os limites de admissibilidade para cada referência.

De referir que os limites a impor às referências correspondem aos que forem mais restritivos.

#### 4.4.5 Diagnóstico de Falhas

Tendo por base os resíduos gerados pelo módulo de detecção e isolamento de falhas e pelo módulo de validação dos valores medidos pelos sensores, o sistema de supervisão realiza a avaliação das falhas detectadas e isoladas, determinando, essencialmente a sua dimensão e, conseqüentemente, o seu grau de severidade. Esta operação pode ser integrada nas tarefas do supervisor, tal como é indicado na Figura 4.8, ou ser concretizada num módulo específico de identificação, conforme é apresentado na arquitectura global do sistema de supervisão e controlo (Figura 4.1).

Uma das metodologias consideradas para a identificação das falhas corresponde ao mecanismo baseado em lógica difusa, proposto para o supervisor na secção 4.4.2. Tendo em conta que a abordagem proposta no capítulo 3 para o diagnóstico de falhas possibilita a detecção e o isolamento das falhas, a tarefa do supervisor consiste em avaliar o conjunto de resíduos obtidos em representação da falha ocorrida.

Complementarmente, referem-se a seguir duas outras metodologias de análise de resíduos. Uma baseia-se na técnica de verificação da ultrapassagem de limiares constantes (*thresholds*) pelos valores absolutos dos resíduos ou da sua variação temporal. Estabelecendo vários níveis para esses limiares, obtém-se um mecanismo simples de estimação qualitativa da amplitude da falha e, assim, de avaliar o seu grau de severidade.

Um dos problemas da utilização de limiares fixos prende-se com a obtenção de falsos alarmes quando os resíduos sofrem os efeitos de perturbações, de ruído e das características não lineares do processo. Para reduzir a taxa de falsos alarmes, propõe-se a consideração de bandas em torno do limiar constante associado a cada nível de falha. Deste modo, a classificação da existência de uma falha com um determinado nível de severidade só é considerada quando o resíduo ultrapassa o limite exterior dessa banda durante um período de tempo superior a um tempo mínimo predefinido. Este tempo mínimo pretende evitar a consideração de falhas quando o resíduo apresenta picos espúrios resultantes de perturbações transitórias. De modo semelhante, após a identificação de uma falha num determinado nível, essa classificação só é desactivada quando o resíduo apresenta valores inferiores a o limite mínimo da referida banda.

Em alternativa, considera-se uma metodologia que se baseia em limiares adaptativos, os quais procuram ter em conta as incertezas entre o modelo linear e o processo real. Uma das conseqüências dessas incertezas traduz-se no facto dos resíduos poderem apresentar valores não nulos quando não ocorrem falhas. Dado que estes desvios dependem, frequentemente, da amplitude e frequência dos sinais de entrada, considera-se que o resíduo é definido por uma parte estática, proporcional ao sinal de entrada, e uma parte dinâmica dependente da sua variação. Neste contexto, em Höfling and Isermann (1996) sugere-se a utilização de um limiar adaptativo que usa um filtro passa alto de primeira ordem (HPF), conforme a representação da Figura 4.9.

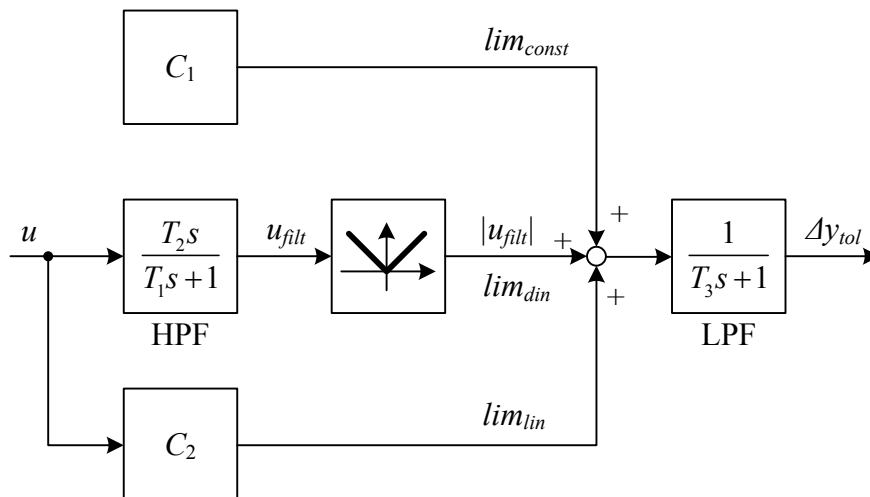


Figura 4.9: Avaliação de resíduos com um limiar adaptativo.

Desta forma, o limiar adaptativo  $\Delta y_{tol}$  resulta da aplicação de um filtro passa baixo (LPF), usado para suavizar o limiar, ao somatório de três componentes: o limiar constante,  $lim_{const}$ , o limiar dinâmico,  $lim_{din}$ , e o limiar linear,  $lim_{lin}$ . O primeiro corresponde ao limiar fixo, referido anteriormente, definido para avaliar a amplitude da falha. O limiar dinâmico corresponde ao valor absoluto do sinal resultante da aplicação do filtro passa alto (HPF) ao sinal de entrada  $u$ . O limiar linear introduz um alargamento da tolerância proporcional ao sinal de entrada  $u$ . As constantes de tempo  $T_1$  e  $T_3$  são seleccionadas de acordo com a constante de tempo dominante do processo. A relação  $T_2/T_1$  depende do tipo de incerteza considerada no modelo que caracteriza a dinâmica do processo.

## 4.5 Conclusão

Iniciou-se este capítulo com a apresentação e descrição da arquitectura proposta neste trabalho para o sistema de supervisão e controlo com tolerância a falhas. Nesta arquitectura são considerados três níveis: o de processo, o de execução e o de supervisão. O primeiro inclui o processo propriamente dito e os elementos sensoriais e de actuação.

O nível intermédio contém os módulos de interface analógico-digital e digital-analógico, o módulo de acondicionamento e validação das medições, o módulo de observadores do processo, o módulo de diagnóstico de falhas, o módulo executor das decisões do supervisor, o sistema de controlo e o módulo de reconfiguração.

No nível de supervisão é estabelecida a interface com o supervisor humano e, usando os resíduos representativos das falhas e a informação sobre o processo, efectua a identificação das falhas e do modo de funcionamento do processo.

O módulo supervisor gera as decisões adequadas à satisfação dos objectivos enunciados para o sistema em malha fechada que incluem a obtenção, com robustez, de estabilidade, desempenho e tolerância a falhas.

Ao longo do capítulo são descritas as metodologias consideradas no projecto e implementação dos principais módulos da arquitectura.

No caso do módulo supervisor propõe-se a utilização de uma metodologia baseada em lógica difusa que, a partir dos resíduos e dos sinais do processo, identifique o modo de funcionamento e, conseqüentemente, seleccione o controlador adequado. No caso de ser detectada uma falha e assumindo a existência de redundância no processo, o supervisor envia ao executor a decisão para gerar as acções correctivas que envolvem, normalmente, a reconfiguração do sistema através de sensores e actuadores virtuais. O sensor virtual é usado na estimação da saída de um sensor com falha e o controlador virtual efectua a redistribuição da acção de controlo do actuador em falha pelos restantes actuadores disponíveis.

Relativamente ao sistema de controlo, considera-se que é constituído por um conjunto de controladores projectados para os vários modos de funcionamento previstos para o processo, usando a metodologia de projecto de controladores robustos com tolerância a falhas, proposto no capítulo 3.

No final referem-se também os mecanismos usados para a validação do sinal de referência e de avaliação do grau de severidade das falhas.

A aplicação deste sistema de supervisão e controlo a processos reais, é descrita no capítulo 5.

## 5. Casos de Estudo

Para avaliar o desempenho, a robustez e a tolerância a falhas do sistema de supervisão e controlo proposto, apresentam-se, neste capítulo, os resultados da aplicação das metodologias propostas a três casos de estudo: o “Pêndulo Invertido”, o Campo de Colectores Solares existente na Plataforma Solar de Almería (Espanha) e o processo “Três Tanques”.

Estes resultados correspondem à aplicação selectiva dos módulos que constituem o sistema de supervisão e controlo aos processos, de acordo com as suas características próprias.

Tendo em conta a interface com os vários processos, na secção 5.1 descrevem-se, de uma forma genérica, os elementos que contribuem para as equações de calibração do sistema computadorizado de aquisição e actuação.

Dado que o processo laboratorial “Pêndulo Invertido” é instável em malha aberta e não apresenta elementos redundantes, na secção 5.2 apresentam-se os resultados da aplicação do módulo de controlo com tolerância passiva a falhas e do módulo de diagnóstico de falhas, conforme a abordagem proposta no capítulo 3.

O Campo de Colectores Solares foi essencialmente utilizado para testar o mecanismo de supervisão, proposto no capítulo 4, pois sendo caracterizado por uma dinâmica variante no tempo, permitiu verificar o desempenho do supervisor na selecção do controlador adequado a cada modo de funcionamento nominal. Os resultados são apresentados na secção 5.3.

Na secção 5.4 apresentam-se alguns resultados da aplicação ao processo laboratorial “Três Tanques”. Os casos considerados incluem a resposta do sistema de supervisão e controlo, proposto no capítulo 4, a falhas em sensores, a falhas em componentes do processo e a perturbações.

O capítulo termina com a secção 5.5 onde são referidas as principais conclusões sobre a aplicabilidade das propostas, tendo por base os resultados obtidos nos casos de estudo.

## 5.1 O Sistema computadorizado de aquisição e de actuação

A base da estrutura de um sistema de supervisão e controlo de processos dinâmicos é constituída, essencialmente, pelo sistema computadorizado de aquisição e de actuação e pela instrumentação de medição e de acção sobre as grandezas do processo. Para a obtenção do valor medido de uma grandeza física consideram-se, tipicamente, os elementos representados na Figura 5.1.

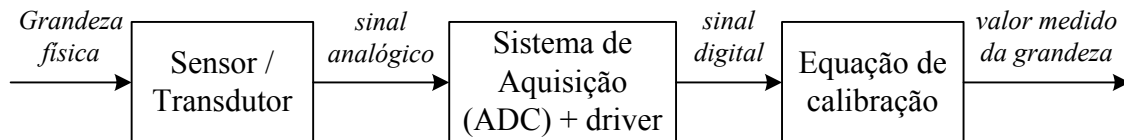


Figura 5.1: Medição de uma grandeza física usando um sistema computadorizado de aquisição.

O bloco que representa o sensor (elemento sensível à grandeza que se pretende medir) e o transdutor pode ser visto como um dispositivo responsável pela conversão de uma grandeza física num sinal eléctrico, por exemplo, em tensão. O sinal que é transmitido para o sistema de aquisição passa, habitualmente, por um amplificador com um ganho (normalmente programável), antes da sua conversão analógico-digital (ADC). Para obter o valor digital da grandeza medida, é aplicada uma equação de calibração ao sinal digital disponibilizado pelo *driver* que controla o sistema de aquisição.

Para definir a equação de calibração que permite obter o valor medido da grandeza,  $y$ , a partir do valor do sinal digital,  $vd$ , considera-se o seguinte:

- i) O bloco sensor/transdutor tem uma saída na gama  $[V_{t_{ymin}}; V_{t_{ymax}}]$  (ou na gama  $[V_{t_{ymax}}; V_{t_{ymin}}]$ ), correspondendo a uma gama da grandeza a medir  $[y_{min}; y_{max}]$  através de uma relação directa (ou em oposição);
- ii) O ganho seleccionado para o amplificador do sistema de aquisição,  $g_{amp}$ , permite obter a melhor resolução do sinal digital à saída do ADC;
- iii) A gama do canal de entrada do sistema de aquisição  $[V_{min}; V_{max}]$  relaciona-se com a do sinal digital  $[vd_{Vmin}; vd_{Vmax}]$  (ou  $[vd_{Vmax}; vd_{Vmin}]$ ) por uma correspondência directa (ou em oposição).

A equação de calibração para a aquisição vem dada por:

$$y = \frac{y_{max} - y_{min}}{V_{t_{ymax}} - V_{t_{ymin}}} \left( \frac{1}{g_{amp}} \left( \frac{V_{max} - V_{min}}{vd_{Vmax} - vd_{Vmin}} (vd - vd_{Vmin}) + V_{min} \right) - V_{t_{ymin}} \right) + y_{min} \quad (5.1)$$

Relativamente à acção sobre uma grandeza física, consideram-se os elementos representados na Figura 5.2.

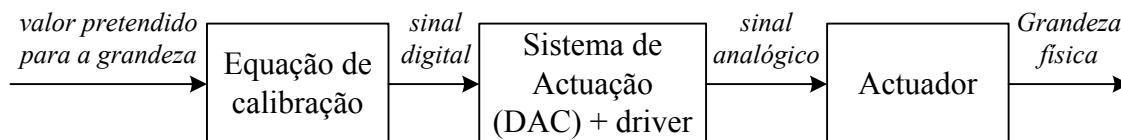


Figura 5.2: Acção sobre uma grandeza física usando um sistema computadorizado de actuação.

O actuador representa o sistema responsável pela conversão do sinal analógico eléctrico numa acção sobre a grandeza física. O sinal que é transmitido pelo sistema de actuação resulta da conversão digital-analógica (DAC) do valor digital recebido pelo *driver* que controla o sistema de actuação. Esse valor digital é obtido pela aplicação da equação de calibração ao valor pretendido para a grandeza física.

Para definir a equação de calibração que determina o valor digital,  $vd$ , correspondente ao valor pretendido para a grandeza física,  $u$ , considera-se o seguinte:

- iv) O actuador apresenta uma gama de entrada  $[Va_{umin}; Va_{umax}]$  (ou  $[Va_{umax}; Va_{umin}]$ ), correspondendo a uma gama da grandeza de actuação  $[u_{min}; u_{max}]$  através de uma relação directa (ou em oposição);
- v) A gama do canal de saída do sistema de actuação  $[V_{min}; V_{max}]$  relaciona-se com a do sinal digital  $[vd_{Vmin}; vd_{Vmax}]$  (ou  $[vd_{Vmax}; vd_{Vmin}]$ ), através de uma correspondência directa (ou em oposição).

A equação de calibração para a actuação vem dada por:

$$vd = \frac{vd_{Vmax} - vd_{Vmin}}{V_{max} - V_{min}} \left( \frac{Va_{umax} - Va_{umin}}{u_{max} - u_{min}} (u - u_{min}) + Va_{umin} - V_{min} \right) + vd_{Vmin} \quad (5.2)$$

A operação de calibração de todo o sistema de aquisição e de actuação deverá assegurar um mapeamento correcto entre os valores das grandezas físicas e os valores digitais correspondentes, considerando a selecção de um ganho para o sistema de aquisição que garanta a maximização da resolução do valor digital. Nas secções seguintes serão apresentadas as concretizações das equações (5.1) e (5.2) para a calibração dos casos de estudo.

## 5.2 Processo “Pêndulo Invertido”

O “Pêndulo Invertido” é um processo laboratorial não linear que apresenta um comportamento dinâmico instável em malha aberta que pode representar o comportamento de sistemas críticos como helicópteros, aviões, foguetões ou de sistemas de apoio ao posicionamento vertical de pessoas paraplégicas (Holderbaum *et al.*, 2002).

O processo tem, essencialmente, duas configurações possíveis: o pêndulo na posição de oscilação e o pêndulo na posição invertida. Neste trabalho o processo será usado com o pêndulo invertido sendo necessário, na fase inicial, proceder à sua elevação (*swing-up*).

Para isso foi projectado um supervisor com uma máquina de estados tendo como objectivo proceder à elevação do pêndulo de uma forma automática e no menor tempo possível, estabelecendo as transições de estado em função da posição angular do pêndulo e

da sua velocidade angular. Outras propostas referenciadas na literatura consideram o projecto baseado no controlo da energia do pêndulo (Yoshida, 1999; Aström and Furuta, 2000; Bugeja, 2003; Yamakawa *et al.*, 2005) ou enquadrado num problema de estabilização global (Srinivasan *et al.*, 2002).

Os objectivos do projecto do sistema de supervisão e controlo consistem na obtenção de um sistema em malha fechada com estabilidade e desempenho robusto e com tolerância a falhas com um grau de severidade reduzido em sensores e no actuador. Sempre que possível, o sistema deverá acomodar falhas nos sensores. O processo é representado por um modelo linear com incertezas.

### 5.2.1 Descrição do Processo

O processo laboratorial “Pêndulo Invertido” (Amira, 1996a) é um processo multivariável com uma entrada e duas saídas (Figura 5.3).

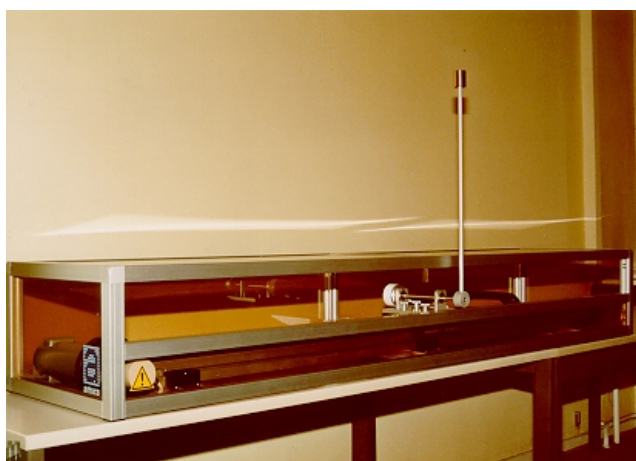
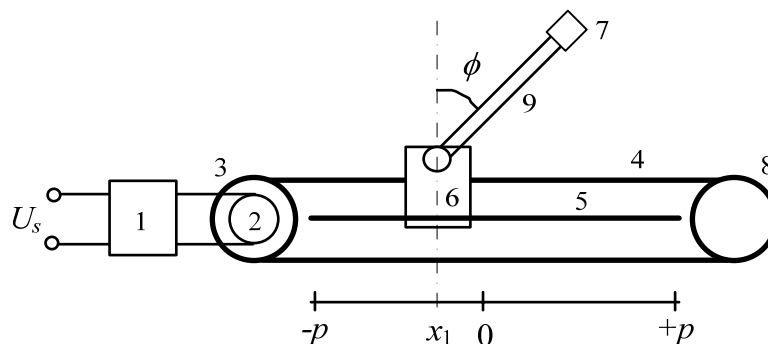


Figura 5.3: O processo laboratorial “Pêndulo Invertido”.

O processo consiste num pêndulo montado numa base móvel (carro) que se pode deslocar ao longo de uma calha metálica fixa. O pêndulo é constituído por uma haste de alumínio com uma massa cilíndrica na extremidade e encontra-se ligado ao carro através de um eixo perpendicular à direcção de movimento do carro que pode rodar 360°.

O carro está ligado a duas roldanas através de uma correia de transmissão. Uma delas tem um motor acoplado (componente de actuação) que produz uma rotação proporcional à tensão  $U_s$  que é fornecida ao motor. A representação esquemática da Figura 5.4 descreve os elementos principais do processo.





- |                            |                    |                      |
|----------------------------|--------------------|----------------------|
| 1 - Servo-Amplificador     | 2 - Motor          | 3 - Roldana          |
| 4 - Correia de Transmissão | 5 - Calha metálica | 6 - Carro            |
| 7 - Peso cilíndrico        | 8 - Roldana        | 9 - Haste do Pêndulo |

Figura 5.4: Representação esquemática do processo “Pêndulo Invertido”.

A posição relativa do carro é medida através de um sensor que consiste num potenciômetro rotativo associado a uma das roldanas. O seu valor pode variar entre os limites físicos do processo,  $-p$  e  $+p$ . De referir que o sistema possui um sistema de segurança automático para protecção contra a ultrapassagem desses limites. Sempre que um dos sensores de fim de curso, colocados nos extremos da calha, detecta o posicionamento crítico do carro, o processo é parado automaticamente. Para medir a posição angular do pêndulo,  $\phi$ , o sistema tem outro potenciômetro rotativo acoplado ao eixo de rotação. Para cada um dos sensores existe um transdutor com um codificador (*encoder*) incremental.

O sistema, conforme o diagrama da Figura 5.5, é caracterizado por duas saídas mensuráveis, a posição relativa do carro,  $x_1$ , e a posição angular do pêndulo,  $\phi$ , sujeitas a falhas,  $f_{s1}$  e  $f_{s2}$ , e a ruído,  $n_1$  e  $n_2$ , respectivamente, e por uma entrada, a força exercida no carro,  $F$ , também sujeita a falhas,  $f_a$ .

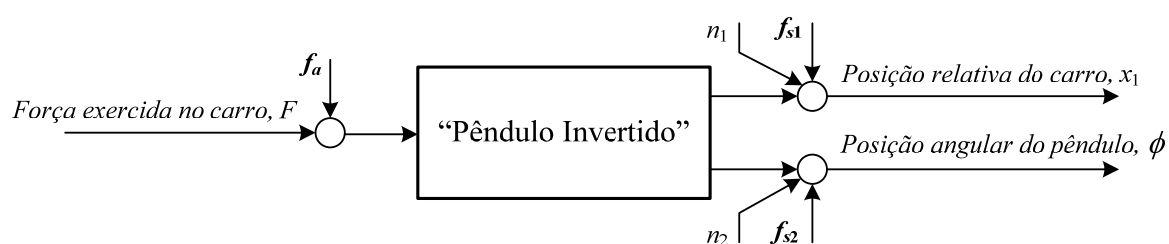


Figura 5.5: Diagrama do processo “Pêndulo Invertido”.

### 5.2.1.1 Calibração do Sistema

Para a comunicação entre a instrumentação do processo e o computador digital (PC) considerou-se o equipamento de acondicionamento de sinal fornecido com o processo e uma placa de aquisição e de actuação, DIC24 da Amira, com entradas associadas aos sinais

dos codificadores incrementais e dois conversores digital-analógicos (DAC) com uma resolução de 12 bits. O *driver* da placa foi usado no software de interface desenvolvido na linguagem de programação Borland C++.

Como a aquisição das saídas medidas utiliza mecanismos diferentes dos pressupostos na definição da equação (5.1), esta não se aplica neste caso. No entanto, a seguir indicam-se as equações de calibração usadas para a obtenção dos valores medidos a partir dos dados gerados pelos codificadores (*Inc\_Offset0* e *Inc\_Offset1* são parâmetros de configuração):

$$x_1 = \frac{x_1d - Inc\_Offset0}{4096} \times 0.18 \quad [m] \quad (5.3)$$

$$\phi = \frac{\phi d - Inc\_Offset1}{16384} \times 2\pi \quad [rad] \quad (5.4)$$

Para a actuação no processo foi usado um dos canais de saída da placa na gama entre  $-10V$  e  $+10V$ , correspondendo de uma forma directa à variação entre  $-1$  e  $1$  dos valores digitais ( $Fd$ ) enviados ao *driver* da placa. À variação em tensão corresponde uma variação da força exercida sobre o carro ( $F$ ) entre  $-20N$  e  $+20N$ . Usando a equação (5.2) para a calibração do actuador (dado o tipo de sinal usado na aquisição, a equação (5.1) não se aplica) obtém-se a seguinte equação de calibração:

$$Fd = 0.05 \times F \quad (5.5)$$

A identificação experimental veio confirmar esta equação de calibração.

Dado que os transdutores associados à posição do carro e ao ângulo do pêndulo obtêm valores relativos, é necessário efectuar, no início da experiência, o ajuste da posição intermédia do carro ( $x_1=0$ ) e da posição de repouso do pêndulo ( $\phi=180^\circ$ ).

### 5.2.2 O Modelo do Processo

O modelo analítico não linear do “Pêndulo Invertido” é descrito por equações diferenciais associadas ao movimento do carro e do pêndulo. Para a obtenção dessas equações assume-se que o pêndulo é uma estrutura rígida de massa  $M_p$  que está concentrada no seu centro de gravidade a uma distância  $l$  do seu eixo de rotação.

A força  $F_p$  exercida pelo carro sobre o pêndulo tem componentes nas direcções horizontal ( $F_{pH}$ ) e vertical ( $F_{pV}$ ).

Na Figura 5.6 pode observar-se o modelo simplificado do processo, onde  $M_c$  e  $F$  representam a massa do carro e a força exercida sobre o carro, respectivamente.

Para obter o modelo matemático usa-se a 2ª Lei de Newton que estabelece o balanço das forças exercidas no carro e no pêndulo segundo as direcções horizontal e vertical.

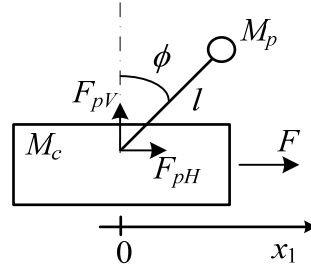


Figura 5.6: Modelo simplificado do “Pêndulo Invertido”.

Aplicando a lei de Newton para as forças exercidas no carrinho segundo a direcção horizontal e considerando a constante de atrito do carrinho proporcional à velocidade,  $F_r$ , obtém-se a equação:

$$F - F_{pH} - F_r \dot{x}_1 = M_c \ddot{x}_1 \quad (5.6)$$

Para as forças exercidas no pêndulo na direcção horizontal, obtém-se:

$$F_{pH} = M_p \frac{d^2}{dt^2} (x_1 + l \sin(\phi)) = M_p (\ddot{x}_1 + l \ddot{\phi} \cos(\phi) - l \dot{\phi}^2 \sin(\phi)) \quad (5.7)$$

A equação para as forças exercidas sobre o pêndulo na direcção vertical vem dada por:

$$F_{pV} = M_p g + M_p \frac{d^2}{dt^2} (l \cos(\phi)) = M_p g - M_p l (\ddot{\phi} \sin(\phi) + \dot{\phi}^2 \cos(\phi)) \quad (5.8)$$

Para representar o movimento de rotação do centro de gravidade do pêndulo aplica-se a lei da conservação do momento angular, obtendo-se a equação:

$$\Theta_s \ddot{\phi} = F_{pV} l \sin(\phi) - F_{pH} l \cos(\phi) - C \dot{\phi} \quad (5.9)$$

Nesta equação  $\Theta_s$  representa o momento de inércia do pêndulo em relação ao seu centro de gravidade e  $C$  a constante de atrito do pêndulo.

Substituindo  $F_{pH}$  e  $F_{pV}$  nas equações (5.6) e (5.9) obtém-se o seguinte modelo não linear:

$$\begin{cases} F = (M_c + M_p) \ddot{x}_1 + F_r \dot{x}_1 + M_p l (\ddot{\phi} \cos(\phi) - \dot{\phi}^2 \sin(\phi)) \\ \Theta_s \ddot{\phi} + C \dot{\phi} + M_p l^2 \ddot{\phi} - M_p g l \sin(\phi) + M_p \ddot{x}_1 l \cos(\phi) = 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

Na Tabela 5.1 apresentam-se os valores nominais dos parâmetros do modelo do processo.

Para obter um modelo linear do processo efectua-se uma linearização do modelo (5.10) para o modo de funcionamento nominal definido por  $x_1 = k_1$  e  $\dot{x}_1 = \phi = \dot{\phi} = 0$ .

Nestas condições, os termos de ordem 2 podem ser negligenciados e os termos com  $\cos(\phi)$  e  $\sin(\phi)$  são linearizados usando a série de Taylor, desprezando os termos de ordem superior a 1.

Tabela 5.1: Valores dos parâmetros do modelo do processo “Pêndulo Invertido”.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Massa do carro	$M_c$	4.0 Kg
Massa do pêndulo	$M_p$	0.36 Kg
Aceleração da gravidade	$g$	9.81 m.s <sup>-2</sup>
Comprimento da haste do pêndulo	$l_p$	0.5 m
Distância do centro de gravidade do pêndulo ao eixo	$l$	0.451 m
Momento de inércia do pêndulo	$\Theta_s$	0.0111 Kg.m <sup>2</sup>
Constante de atrito do carro proporcional à velocidade	$F_r$	10.0 Kg/s
Constante de atrito do pêndulo	$C$	0.00145 Kg.m <sup>2</sup> /s

O modelo linear aproximado do Pêndulo Invertido vem descrito pelas variáveis  $x_1$ ,  $\phi$ ,  $\dot{x}_1$  e  $\dot{\phi}$ , que representam a posição do carro, o ângulo do pêndulo, a velocidade do carro e a velocidade angular do pêndulo, respectivamente. Para reescrever o modelo (5.10) no espaço de estados, considera-se que a variável de entrada é a força exercida pela correia de transmissão sobre o carro,  $u(t) = F(t)$ , e o seguinte vector de estados:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 & \phi & \dot{x}_1 & \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Usando os valores indicados na Tabela 5.1 a descrição do processo no espaço de estados, como resultado da linearização do modelo descrito em (5.10), vem dada por:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.757 & -2.47 & 6.8 \times 10^{-4} \\ 0 & 20.346 & 4.7569 & -0.0185 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.247 \\ -0.475 \end{bmatrix} u(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (5.12)$$

Neste modelo linear não estão representados os efeitos não lineares que resultam, fundamentalmente, do atrito de *Coulomb* e do atrito estático.

O atrito de *Coulomb*  $F_C$  é dado por:

$$F_C = -|F_C| \text{sign}(\dot{x}_1) \quad (5.13)$$

O atrito estático  $F_{SF}$  está relacionado com a força normal à direcção do carro  $F_n$  através do coeficiente de atrito estático  $\mu_{SF}$  e é expresso por:

$$F_{SF} = \begin{cases} -\mu_{SF}F_n & \text{se } \dot{x}_1 = 0 \\ 0 & \text{se } \dot{x}_1 \neq 0 \end{cases} \quad (5.14)$$

Para compensar o efeito destes atritos podem ser considerados mecanismos dinâmicos ou estáticos. O modelo linear (5.12) será válido enquanto as seguintes condições se verificarem:

- O deslocamento do carro está limitado às dimensões da calha, que neste caso implicam  $|x_1| \leq 0.5\text{m}$ .
- O ângulo que o pêndulo faz com a vertical, devido à aproximação considerada para ângulos de baixo valor, deve satisfazer  $|\phi| \leq 10^\circ$ .
- Ter em consideração a zona de funcionamento linear do servo-amplificador a força exercida sobre o carro deve estar restringida por  $|F| \leq 20\text{N}$ .

Os valores próprios da matriz  $A$ ,  $[0 \ 4.4435 \ -4.6965 \ -2.2355]$ , confirmam a instabilidade do sistema em malha aberta. Desta forma, o sistema de controlo será projectado para garantir a estabilidade do sistema em malha fechada, quer na situação nominal quer na presença de ruído, perturbações ou de alguns tipos de falhas.

### 5.2.3 Controlo Tolerante a Falhas

O processo “Pêndulo Invertido” é representado por um modelo linear com incertezas e não apresenta componentes redundantes que permitam efectuar acções de reconfiguração. As falhas a considerar são no actuador e em ambos os sensores. O problema de controlo robusto tolerante a falhas usa a abordagem proposta no Capítulo 3, sendo os objectivos formulados em  $\mathcal{H}_\infty$ .

Os objectivos para o projecto do sistema de controlo generalizado são os seguintes:

- A posição do carro ( $y_1$ ) deve seguir a referência correspondente (*ref*) e a posição angular do pêndulo ( $y_2$ ) deve manter-se muito próximo de zero;
- As saídas devem ser insensíveis ao ruído e a falhas;
- A acção de controlo nas altas frequências deve ser restringida, evitando variações demasiado bruscas;
- Os resíduos  $r_1$ ,  $r_2$  e  $r_3$ , devem ser representativos das falhas no actuador  $f_a$  e nos sensores  $f_{s1}$  e  $f_{s2}$ , respectivamente, tendo em vista a sua detecção e isolamento.
- Estes objectivos devem verificar-se com a presença de incerteza de norma limitada  $\Delta$ .

A estrutura usada para a aplicação da análise e síntese  $\mu$ , está representada na Figura 5.7, onde o processo aumentado  $P$  foi definido considerando as funções de transferência de ponderação que descrevem os objectivos e as ponderação dos sinais de entrada.

A configuração considera as entradas externas  $w_p$  que incluem o ruído nos valores medidos por cada sensor ( $n_1$  e  $n_2$ ) e a referência para a posição do carro ( $ref$ ). As falhas a considerar ( $f_a, f_{s1}, f_{s2}$ ) são representadas pela variável de entrada  $w_f$ . Os objectivos de desempenho e de detecção de falhas correspondem aos sinais externos de saída  $z_p$  e  $z_f$ , respectivamente. As entradas do controlador generalizado são a referência para a posição do carro, as duas saídas do processo (a posição do carro e a posição angular do pêndulo) e as outras duas variáveis de estado (velocidade do carro e velocidade angular do pêndulo) geradas pelo observador. Relativamente às saídas, a acção de controlo é gerada pelo controlador e os resíduos derivam do módulo de diagnóstico de falhas.

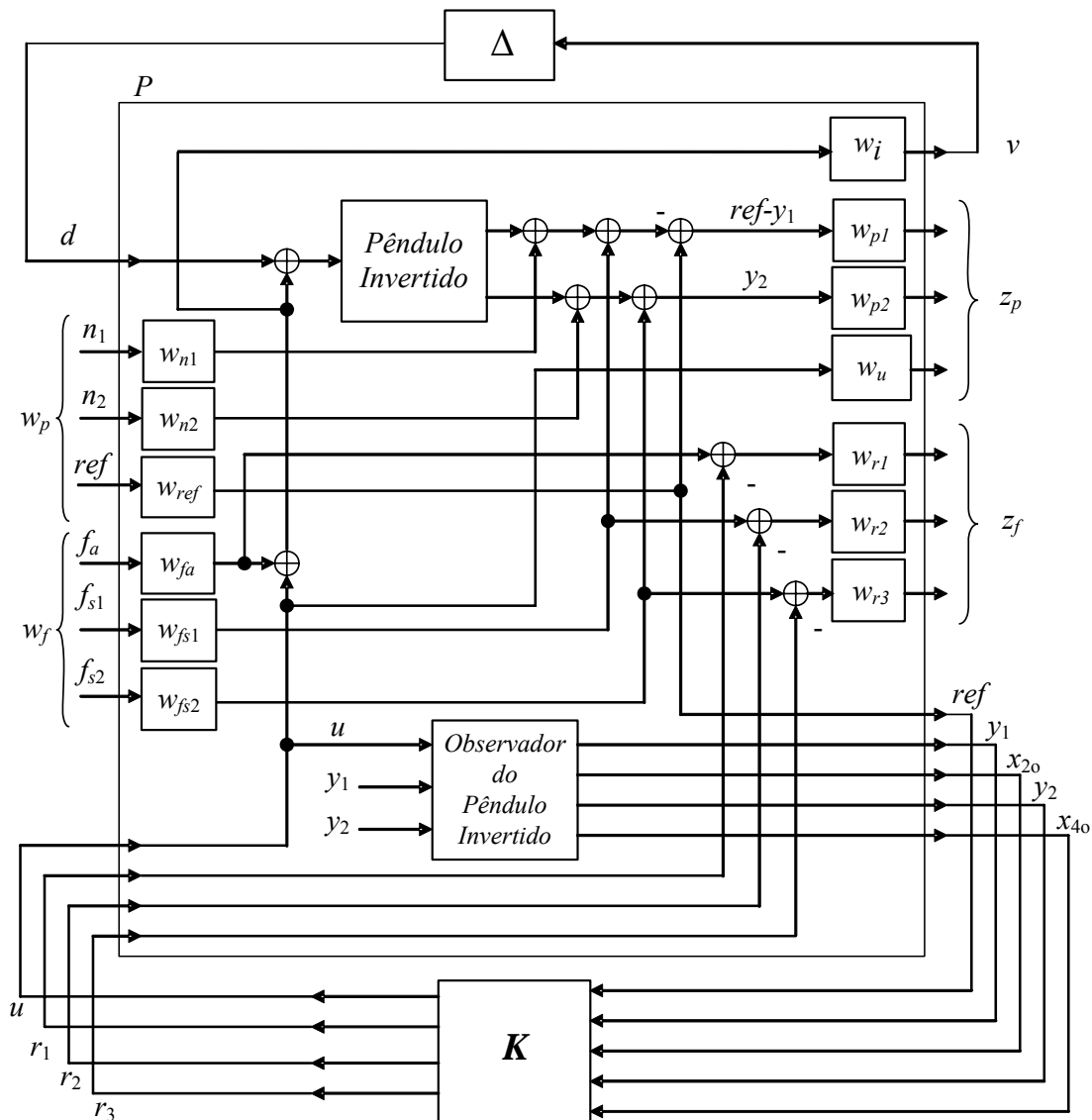


Figura 5.7: Configuração para o projecto simultâneo do controlador robusto e do detector de falhas no "Pêndulo Invertido".

Para enquadrar o problema de controlo e detecção de falhas numa formulação em  $\mathcal{H}_\infty$  adequada à síntese  $\mu$ , representou-se a incerteza,  $\Delta$ , por uma perturbação limitada na sua norma e por uma função de transferência de ponderação. As especificações para o sistema em malha fechada são igualmente expressas no domínio da frequência como funções de transferência de ponderação.

A selecção apropriada destas funções é uma tarefa fundamental para a definição do problema em termos dos compromissos de controlo e de diagnóstico das falhas.

### 5.2.3.1 Descrição da Incerteza

O processo “Pêndulo Invertido” é representado por um modelo linear nominal,  $G_{nom}(s)$ , com uma componente de incerteza que permite representar o comportamento dinâmico do processo no modo de funcionamento nominal.

Neste caso, a incerteza do modelo é representada por incerteza estruturada multiplicativa à entrada. O processo vem então descrito por:

$$G(s) := \left\{ G_{nom}(s)(1 + \Delta(s)w_i(s)) : \Delta(s) \text{ estável}, \|\Delta(s)\|_\infty \leq 1 \right\} \quad (5.15)$$

Essencialmente, a incerteza do modelo deve-se a erros de modelização (discrepâncias entre o modelo e o processo real) e às características não lineares do processo. As mais significativas resultam do atrito dinâmico (atrito de Coulomb) e do atrito estático que actua no carro. Deste modo, a incerteza do modelo é descrita pela seguinte função de transferência de ponderação:

$$w_i(s) = \frac{0.05(s+2)}{s^2 + 0.07s + 0.49} \quad (5.16)$$

### 5.2.3.2 Especificações de Desempenho

Para representar os objectivos de desempenho (objectivos de projecto *i*), *ii*) e *iii*)) definem-se as funções de transferência entre as entradas  $w_1$  e  $w_2$  e a saída  $z_1$ ,  $w_{p1}$ ,  $w_{p2}$  e  $w_u$ . As funções de transferência  $w_{n1}$ ,  $w_{n2}$ ,  $w_{ref}$ ,  $w_{fa}$ ,  $w_{fs1}$  e  $w_{fs2}$  são definidas de forma a expressar o conhecimento sobre o ruído associado a cada sensor, a referência para a posição do carro e sobre as falhas previstas, respectivamente. Estas funções são escolhidas de forma a satisfazer:

$$\|w_{out}T_{out,in}w_{in}\|_\infty \leq 1, \quad \forall \Delta \text{ satisfazendo } \|\Delta\|_\infty \leq 1 \quad (5.17)$$

Relativamente as sinais de entrada, assume-se que estão limitados de acordo com:

- a) o ruído nas medições é ruído branco de baixa potência;
- b) o sinal de referência satisfaz  $|ref| \leq 0.3m$ ;
- c) a falha no actuador está limitada por  $|f_a| \leq 2N$ ;
- d) as falhas nos sensores da posição do carro e da posição angular do pêndulo estão restringidas por  $|f_{s1}| \leq 0.2m$  e  $|f_{s2}| \leq 2^\circ$ , respectivamente.

Tendo por base estas restrições, as funções de transferência de ponderação das entradas vêm dadas por:

$$\begin{aligned}
 w_{n1}(s) &= \frac{0.005(s+1)}{0.5s+1} & w_{n2}(s) &= \frac{0.0025(2s+1)}{s+1} \\
 w_{ref}(s) &= 0.3 \\
 w_{fa}(s) &= 2 & w_{fs1}(s) &= 0.2 & w_{fs2}(s) &= 0.035
 \end{aligned} \tag{5.18}$$

Relativamente aos objectivos de desempenho, consideraram-se as seguintes especificações:

- a) para o sinal de erro dado por  $(ref - y_1)$ : erro em regime estacionário inferior a 8%; amplificação nas altas-frequências inferior a 4dB; largura de banda em malha fechada superior a 0.2rad/s;
- b) para o sinal de saída  $y_2$ : erro em regime estacionário inferior a 0.036rad; atenuação nas altas-frequências inferior a -20dB; largura de banda em malha fechada superior a 0.3rad/s;
- c) para a acção de controlo  $u$ : amplitude nas baixas frequências inferior a 10N; amplitude para frequências superiores a 0.05rad/s inferior a 2N.

Usando estes requisitos de desempenho, obtêm-se as seguintes funções de transferência de ponderação:

$$w_{p1}(s) = \frac{12.5(5s+1)}{100s+1} \quad w_{p2}(s) = \frac{27.8(3.3s+1)}{10s+1} \quad w_u(s) = \frac{10s+1}{20s+10} \tag{5.19}$$

### 5.2.3.3 Especificações de Diagnóstico de Falhas

Para satisfazer os requisitos relativos ao diagnóstico de falhas previstas nos sensores e no actuador (objectivo de projecto *iv*)), as funções de transferência de ponderação entre as entradas  $w_1$  e  $w_2$  e a saída  $z_2$  são definidas por  $w_{r1}$ ,  $w_{r2}$  e  $w_{r3}$ .



Assumindo os pressupostos definidos anteriormente para as falhas e pretendendo-se obter um bom desempenho no diagnóstico de falhas nas baixas frequências, as funções de transferência de ponderação associadas aos resíduos são dadas por:

$$w_{r1}(s) = \frac{10(s+1)}{10s+1} \quad w_{r2}(s) = \frac{4(0.2s+1)}{2s+1} \quad w_{r3}(s) = \frac{10(0.5s+1)}{s+1} \quad (5.20)$$

#### 5.2.3.4 Síntese do Controlador e do Módulo de Diagnóstico

Para obter o controlador generalizado (controlador e modulo de diagnóstico) para o Pêndulo Invertido satisfazendo os objectivos de projecto, aplica-se a metodologia proposta no Capítulo 3 que se baseia na síntese  $\mu$ . Considerando a formulação do problema numa estruturada  $M-\Delta$  e o valor singular estruturado, o controlador generalizado deve satisfazer a condição:

$$\|F_u(F_l(P, K), \Delta)\|_\infty = \mu(F_l(P, K)) \leq 1. \quad (5.21)$$

Após a aplicação do procedimento iterativo  $D-K$ , encontrou-se um controlador generalizado de ordem 15, satisfazendo a condição (5.21) com  $\mu = 0.9804$ .

Aplicando a técnica de optimização baseada na norma de Hankel para redução da ordem do controlador, obteve-se uma representação no espaço de estados de ordem 7.

Para a implementação deste controlador generalizado efectuou-se a sua discretização considerando um período de amostragem de 30ms.

### 5.2.4 Resultados

Para testar o controlador generalizado considerou-se uma referência para a posição do carro a variar em degrau com amplitudes de -0.3m e 0.3m e uma periodicidade de 60s.

A resposta temporal do sistema em malha fechada ao sinal de referência, não existindo falhas, está representada na Figura 5.8. Como se pode observar, o sistema em malha fechada apresenta estabilidade, o seguimento da referência é conseguido e os resíduos apresentam valores reduzidos, confirmando a inexistência de falhas.

De forma a analisar o comportamento do sistema na presença de falhas, foram consideradas falhas no actuador e nos sensores entre  $t = 40s$  e  $t = 70s$ .

A resposta a uma falha na acção de controlo ( $f_a = -2N$ ) está representada na Figura 5.9.

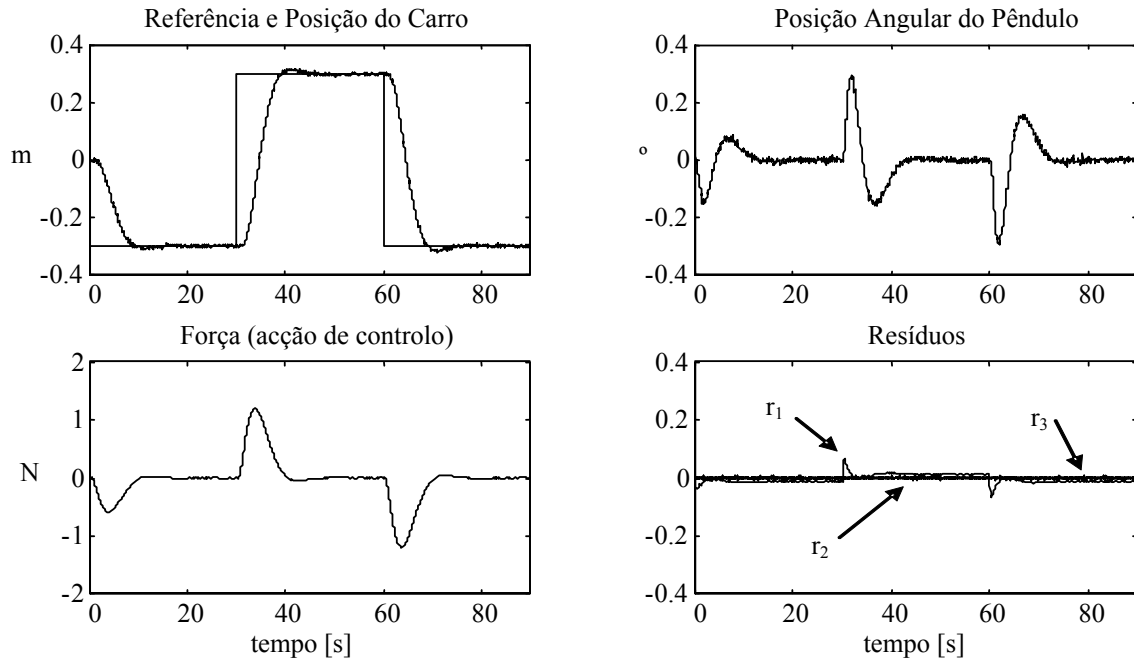


Figura 5.8: Resposta temporal do Pêndulo Invertido em malha fechada a variações em degrau da referência da posição do carro, sem existência de falhas.

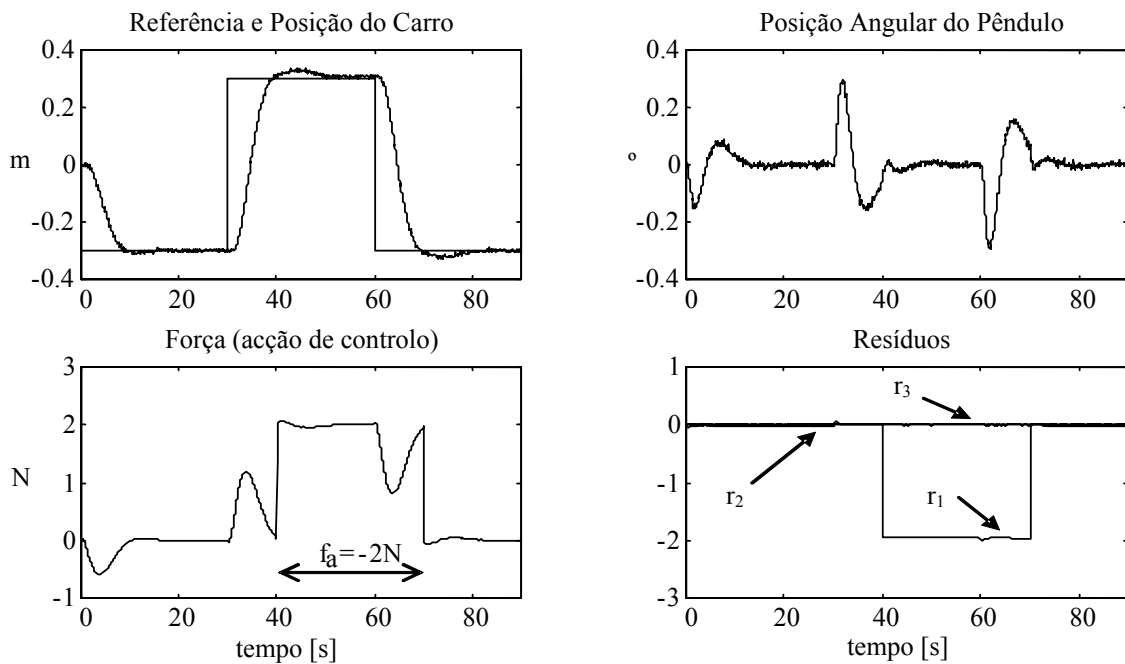


Figura 5.9: Resposta temporal do Pêndulo Invertido em malha fechada a variações em degrau da referência da posição do carro, com uma falha no actuador ( $f_a = -2N$ ), entre  $t = 40s$  e  $t = 70s$ .

Na Figura 5.10 e Figura 5.11 estão representadas as respostas do sistema a falhas no sensor que mede a posição do carro ( $f_{s1} = 0.2m$ ) e no sensor que mede a posição angular do pêndulo ( $f_{s2} = 2^\circ$ ), respectivamente.

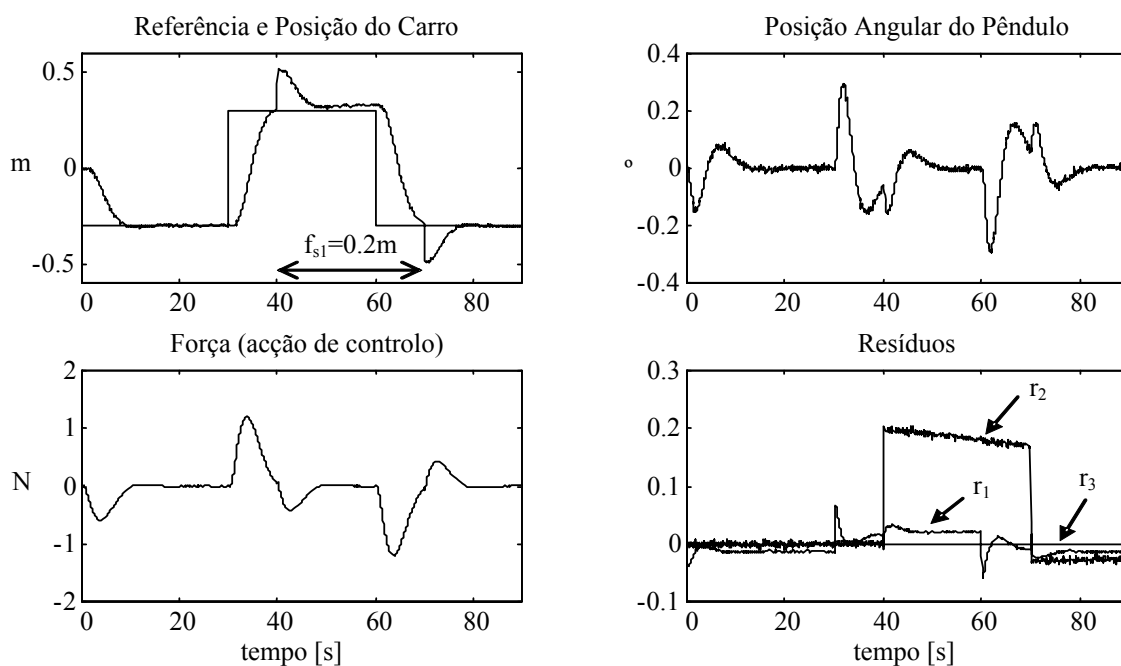


Figura 5.10: Resposta temporal do Pêndulo Invertido em malha fechada a variações em degrau da referência da posição do carro, com uma falha no sensor que mede a posição do carro ( $f_{s1} = 0.2\text{m}$ ), entre  $t = 40\text{s}$  e  $t = 70\text{s}$ .

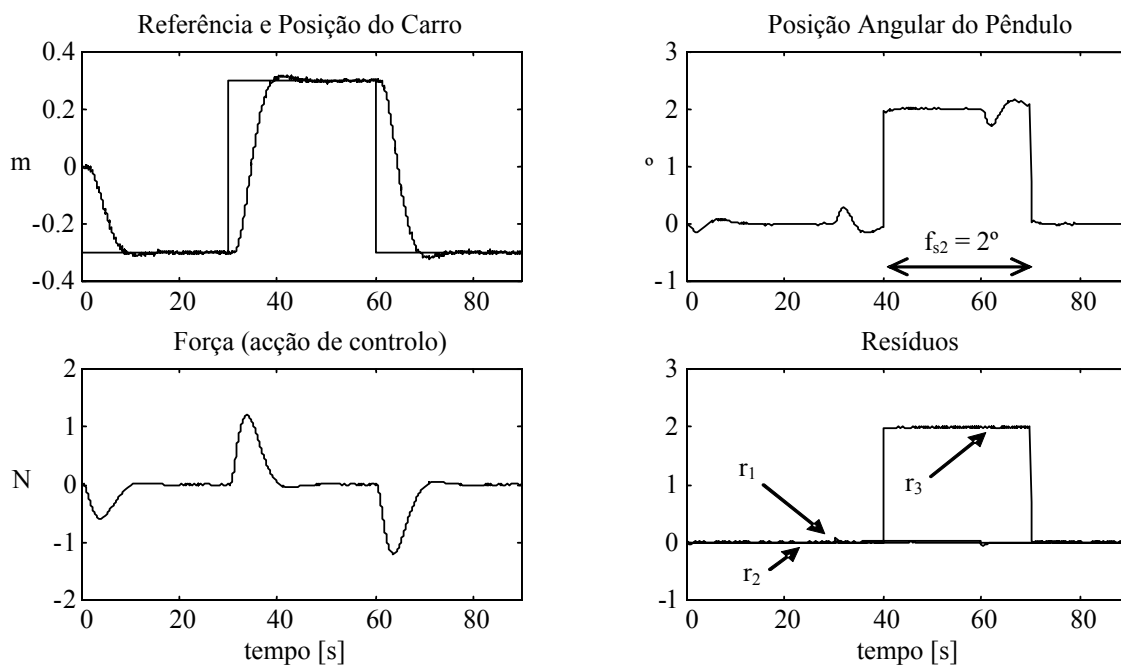


Figura 5.11: Resposta temporal do Pêndulo Invertido em malha fechada a variações em degrau da referência da posição do carro, com uma falha no sensor que mede a posição angular do pêndulo ( $f_{s2} = 2^\circ$ ), entre  $t = 40\text{s}$  e  $t = 70\text{s}$ .

Estes resultados mostram que o sistema em malha fechada com o controlador e o módulo de diagnóstico de falhas é estável para todos os casos analisados e apresenta um desempenho de acordo com os objectivos definidos inicialmente, mesmo na presença de falhas.

Relativamente ao efeito das falhas no actuador e nos sensores, o controlador apresenta robustez e tolerância passiva a essas falhas e os resíduos permitem o seu diagnóstico (detecção, isolamento e identificação), podendo ser usados pelo supervisor para tarefas de monitorização.

### 5.2.5 Análise do Desempenho do Sistema

A formulação integrada dos objectivos de controlo robusto e de diagnóstico de falhas permitiu projectar um controlador generalizado para o processo laboratorial “Pêndulo Invertido”. Para a síntese do controlador robusto e do módulo de diagnóstico aplicou-se o método de síntese  $\mu$  com um procedimento iterativo  $D-K$ , seguido de uma operação de redução de ordem.

A implementação do controlador e do módulo de diagnóstico de falhas mostrou a robustez da solução e a tolerância passiva do controlador em relação às falhas consideradas.

## 5.3 Campo de Colectores Solares

Neste trabalho é proposta uma estratégia de supervisão e controlo do Campo de Colectores Solares baseada no modelo obtido por identificação experimental, usando uma rede neuronal recorrente de Elman.

Uma das características fundamentais de um colector solar é que a sua principal fonte de energia, a radiação solar, não pode ser manipulada. Variando ao longo do dia conduz a alterações da dinâmica do processo e do modo de operação. Para cada modo de funcionamento é possível projectar um controlador que permita obter bons desempenhos de controlo. O sistema de supervisão considerou a metodologia baseada em lógica difusa proposta no capítulo 4, sendo o controlador seleccionado em tempo real e com base em dados reais. Neste caso, considerou-se o projecto de controladores do tipo PID para os modelos lineares obtidos para cada modo de funcionamento previsto, em que os seus parâmetros foram obtidos pelo método de colocação de pólos.

### 5.3.1 Descrição do Processo

O Campo de Colectores Solares da Plataforma Solar de Almería, objecto de estudo, localiza-se no deserto de Tabernas, no sul de Espanha. A Figura 5.12 apresenta duas imagens da instalação em questão. A descrição pormenorizada do campo de colectores solares ‘Acurex’ existente na PSA pode ser encontrada em (Camacho *et al.*, 1988; Camacho *et al.*, 1992).



Figura 5.12: Imagens do Campo de Colectores Solares.

Este sistema de captação de energia solar é constituído por 480 colectores individuais, distribuídos por 20 linhas paralelas orientadas segundo a direcção Este-Oeste e formando 10 ramais independentes passíveis de ser individualmente desactivados, por meio de uma válvula inserida nestes circuitos. Cada ramal apresenta um comprimento total de 172m, com comprimento útil de 142m e uma superfície total de exposição de 2672m<sup>2</sup>.

A superfície de cada colector tem uma forma parabólica-linear, ou seja, apresenta um perfil parabólico, por meio da qual a energia solar se concentra numa linha focal, colinear com o tubo por onde circula o fluido de aquecimento, apresentando cada ramal uma área reflectora útil de aproximadamente 264.4 m<sup>2</sup>. Quanto ao fluido de transporte de energia térmica, o sistema recorre a um óleo sintético, designadamente o Santotherm 55, cujas propriedades físicas mais relevantes se encontram na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Propriedades físicas do óleo.

Propriedades	Valor	Unidade
Massa específica a 25 °C	886.2	kg/m <sup>3</sup>
Calor específico a 25 °C	1907	J/ kg · K
Condutibilidade térmica a 25 °C	0.1891	W/m · K
Viscosidade dinâmica a 25 °C	0.0105	Pa · s
Temperatura máxima admissível	318	°C
Temperatura de auto ignição	357	°C

Na Figura 5.13 apresenta-se esquematicamente a instalação dedicada à captação de energia térmica solar.

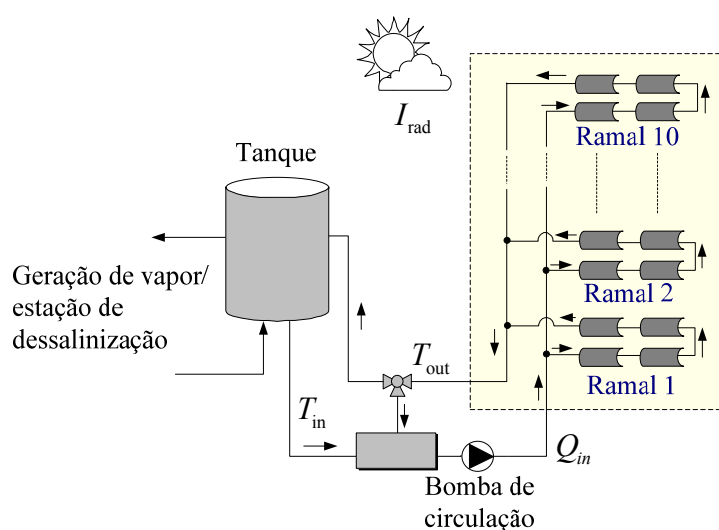


Figura 5.13: Diagrama esquemático do Campo de Colectores Solares.

O sistema, conforme o diagrama Figura 5.14, é caracterizado por uma saída, a temperatura do óleo à saída da instalação,  $T_{out}$ , sujeita a falhas,  $f_{s1}$ , e a ruído,  $n_1$ , por uma entrada controlável, o caudal de óleo definido pela bomba de circulação,  $Q_{in}$ , também sujeita a falhas,  $f_a$ , por duas perturbações mensuráveis, a intensidade da radiação solar,  $I_{rad}$ , e a temperatura do óleo à entrada da instalação,  $T_{in}$ , e por falhas em componentes do processo,  $f_c$  (por exemplo, a supressão de ramais na instalação).

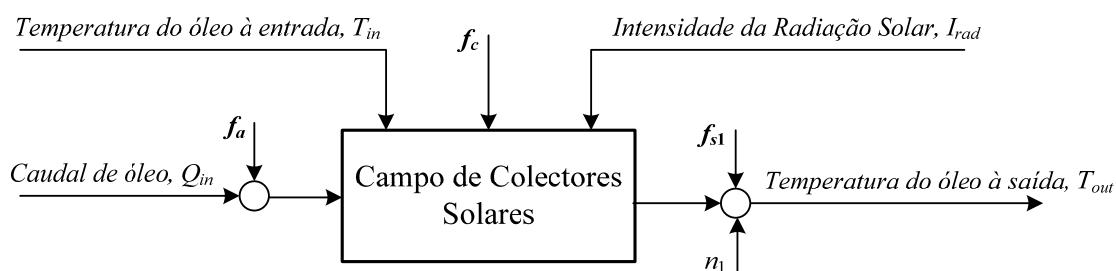


Figura 5.14: Diagrama do Campo de Colectores Solares.

O óleo térmico, à medida que percorre o circuito definido por cada ramal, é aquecido através da energia térmica transferida por um mecanismo de convecção forçada, sendo, após a saída, conduzido a um tanque de acumulação que apresenta um volume de  $143 \text{ m}^3$  e que torna possível a acumulação de cerca de  $2.3 \text{ MW h}$ , sob as condições de temperatura de entrada de  $210^\circ\text{C}$  e temperatura de saída de  $290^\circ\text{C}$ . Devido à dependência da massa específica em relação à temperatura verifica-se um fenómeno de estratificação térmica no seio do tanque, que contribui decisivamente para a acumulação de energia térmica durante vários dias.

### 5.3.2 Modelo do Processo

O Campo de Colectores Solares é um processo dinâmico com uma dimensão industrial que torna a sua modelização analítica complexa e sujeita a vários factores de simplificação que poderão reduzir substancialmente a representatividade do modelo.

Neste trabalho, procedeu-se à identificação do modelo experimental do processo usando redes neuronais. Outra proposta pode ser encontrada, por exemplo, em Juuso (2005).

As redes neuronais recorrentes, que permitem incorporar dinâmica, são mais indicadas para o caso de processos dinâmicos (Jin *et al.*, 1995), tal como é o caso deste processo. Neste contexto, propõe-se a utilização de um caso particular de uma rede recorrente do tipo Elman, conforme descrição no capítulo 3, para obter cada um dos modelos que caracterizam os vários modos de funcionamento do processo, com base em dados reais.

A rede considerada do tipo Elman é descrita pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} T_{out}(k+1) = W^y x(k+1) \\ x(k+1) = \sigma(W^x x_c(k) + W^u Q_{in}(k)) \\ x_c(k) = A x_c(k-1) + x(k) \end{cases} \quad (5.22)$$

onde  $W^y \in \mathcal{R}^{1 \times n_y}$ ,  $W^x \in \mathcal{R}^{n_x \times n_x}$ ,  $W^u \in \mathcal{R}^{n_u \times 1}$ ,  $A \triangleq \alpha \mathcal{I}_{n_x \times n_x}$ ,  $\alpha \in \mathcal{R} \setminus \{0\}$ ,  $k$  representa um instante temporal discreto,  $\sigma(\cdot)$  é uma função sigmoïdal,  $x_c(k)$  é a unidade de contexto e  $x(k)$  pode ser entendido como um estado a estimar.

As unidades de contexto são localmente recorrentes e são afectadas por uma constante multiplicativa  $\alpha$ . As matrizes de ligação  $W^u$ ,  $W^x$  e  $W^y$  são determinadas, neste caso, pelo algoritmo de retropropagação temporal do erro (Werbos, 1990).

Para obter uma representação linear do sistema dinâmico a partir do modelo não-linear definido em (5.22), determina-se a derivada da saída,  $T_{out}$ , em relação à entrada,  $Q_{in}$ . Com a linearização para cada modo de funcionamento, obtém-se um modelo linear em tempo discreto no espaço de estados:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= \bar{A} x(k) + \bar{B} Q_{in}(k) \\T_{out}(k+1) &= \bar{C} x(k+1)\end{aligned}\tag{5.23}$$

onde,  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$  e  $\bar{C}$  são, respectivamente, matrizes de dimensão  $n_x \times n_x$ ,  $n_x \times 1$  e  $1 \times n_x$ .

Os resultados obtidos com a escolha da ordem do modelo  $n_x = 2$ , mostraram que o modelo representava adequadamente o processo em cada modo de funcionamento nominal.

### 5.3.3 Sistema de Supervisão e Controlo

O Campo de Colectores Solares é representado por um conjunto de modelos lineares, obtidos a partir da linearização do modelo experimental para os modos de funcionamento previstos. As falhas a considerar são no sensor de temperatura à saída e na configuração do processo, reduzindo ou aumentando o número de ramais em funcionamento. As principais perturbações no processo são a variação da radiação solar,  $I_{rad}$ , e a temperatura do óleo à entrada,  $T_{in}$ .

O objectivo principal do sistema de controlo do campo de colectores solares consiste em manter a temperatura constante do óleo à saída,  $T_{out}$ , de forma a garantir a sua utilização eficaz na produção de energia. Este objectivo deve ser assegurado apesar da existência de perturbações ou falhas. A característica fundamental do processo reside no facto de que a fonte de energia que permite aquecer o óleo, a radiação solar, não pode ser manipulada pelo sistema de controlo. Assim, como variável de controlo, utiliza-se o fluxo de óleo,  $Q_{in}$ , capaz de influenciar directamente o seu tempo de exposição solar e portanto a sua temperatura. Uma vez que a radiação solar varia durante o dia, devido ao ciclo solar diário, e depende das condições atmosféricas (humidade, nebulosidade ...), as características dinâmicas do processo também variam, levando à existência de vários modos de funcionamento.

Deste modo, a consideração de um controlador único, capaz de operar eficazmente em todos os regimes de operação, apresenta-se como uma tarefa difícil, se não mesmo impossível. Assim, assumindo a existência de um modelo linear para cada modo de funcionamento, considerou-se o projecto de controladores do tipo PID para cada um desses modelos, em que os seus parâmetros foram obtidos de forma a que os pólos do sistema em malha fechada se encontrem em localizações previamente estabelecidas.



### 5.3.3.1 O Sistema de Supervisão

Na formulação do problema assume-se que a dinâmica do processo pode ser representada por um determinado número finito,  $n_m$ , de comportamentos distintos  $P_1, P_2, \dots, P_{n_m}$  e que, para cada um deles, é possível determinar um modelo linear nominal,  $M_i$ . É assumido ainda que, para cada um destes modelos nominais, é possível projectar um controlador fixo,  $K_i$ . Na Figura 5.15 é representada a estrutura de supervisão utilizada, considerando os vários controladores  $K_i$ .

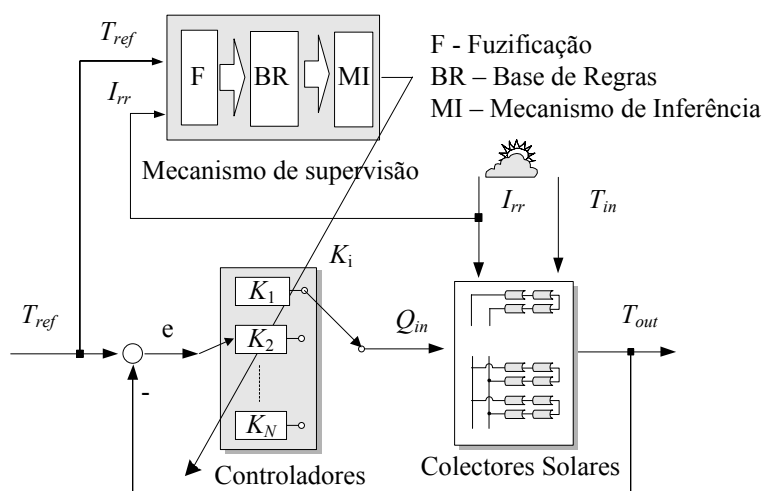


Figura 5.15: Estrutura de supervisão e controlo do Campo de Colectores Solares.

Seguindo a abordagem apresentada no capítulo 4, o supervisor baseia-se em lógica difusa e é constituído por três partes distintas: a fuzificação, a base de regras e o mecanismo de inferência. A primeira parte tem por função converter os valores numéricos da radiação solar,  $I_{rad}$ , e da temperatura de referência,  $T_{ref}$ , em variáveis linguísticas. Estas variáveis definem cada um dos modos de funcionamento.

Os universos de discurso  $I$  e  $T$ , respectivamente, para a radiação solar e para a temperatura de referência, são definidos como:

$$\begin{aligned} I &\equiv [ 600 \text{ W/m}^2, 1000 \text{ W/m}^2 ] \\ T &\equiv [ 230 \text{ }^\circ\text{C}, 270 \text{ }^\circ\text{C} ] \end{aligned} \quad (5.24)$$

As funções de pertença, representadas na Figura 5.16, consideraram-se triangulares e para cada variável foram assumidos cinco termos linguísticos:

$$\{ VS, SM, NO, LA, VL \} = \{ \textit{Very Small}, \textit{Small}, \textit{Normal}, \textit{Large}, \textit{Very Large} \} \quad (5.25)$$

Os conjuntos difusos  $SI$  e  $ST$  são definidos através de conjuntos de pares ordenados:

$$SI = \{ I_{rad}, \mu_I(I_{rad}) \mid I_{rad} \in I \}$$

$$ST = \{ T_{ref}, \mu_T(T_{ref}) \mid T_{ref} \in T \}$$
(5.26)

A base de regras, que define a forma como é seleccionado o controlador, é apresentada na Tabela 5.3. As entradas, radiação solar e temperatura de referência, definem o modo de funcionamento e a saída  $i=1,\dots,25$  é o índice que permite identificar o controlador seleccionado  $K_i$ .

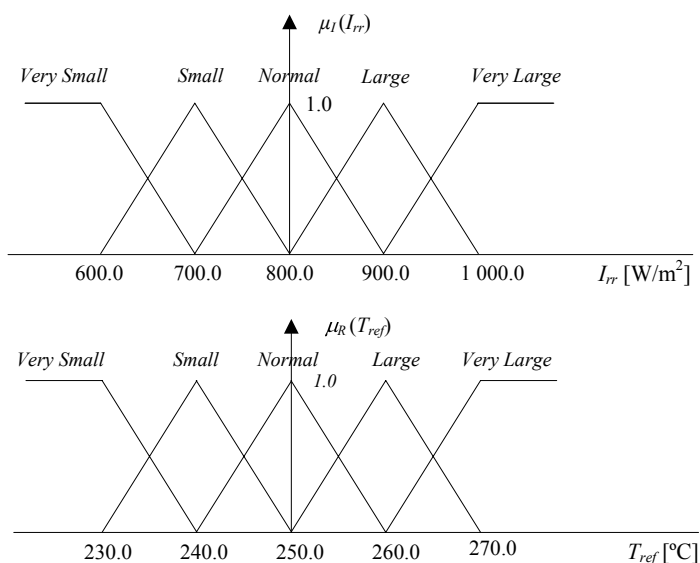
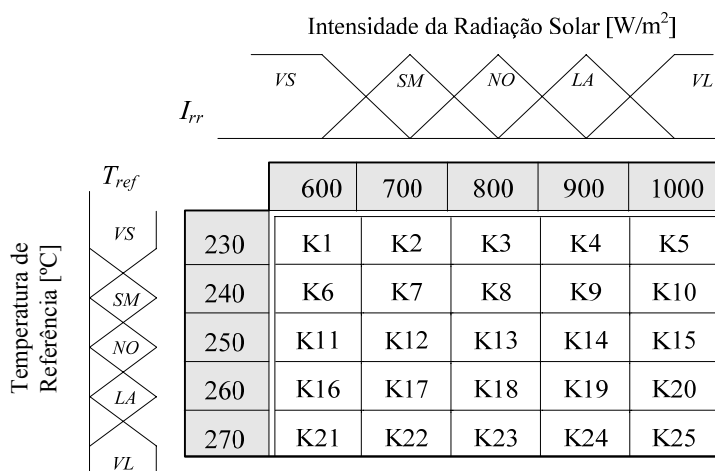


Figura 5.16: Funções de pertinência para a radiação solar,  $I_{rad}$ , e para a temperatura de referência,  $T_{ref}$ .

Tabela 5.3: Base de regras do Supervisor.



Usando esta notação indicada no capítulo 4, a base de regras pode ser rescrita através de regras do tipo:

$$\text{Regra } i: \text{ IF } (I_{rad} \text{ é } SI^{(i)}) \text{ AND } (T_{ref} \text{ é } ST^{(i)}) \text{ THEN } \alpha_i = \mu_I^{(i)}(I_{rad}) \times \mu_T^{(i)}(T_{ref}) \quad (5.27)$$

em que  $i = 1, \dots, 25$ ,  $SI^{(i)}$  e  $ST^{(i)}$  definem, respectivamente, os valores linguísticos das variáveis  $I_{rad}$  e  $T_{ref}$  para a regra  $i$ , sendo  $\mu_I^{(i)}(I_{rad})$  e  $\mu_T^{(i)}(T_{ref})$  os respectivos graus de pertença.

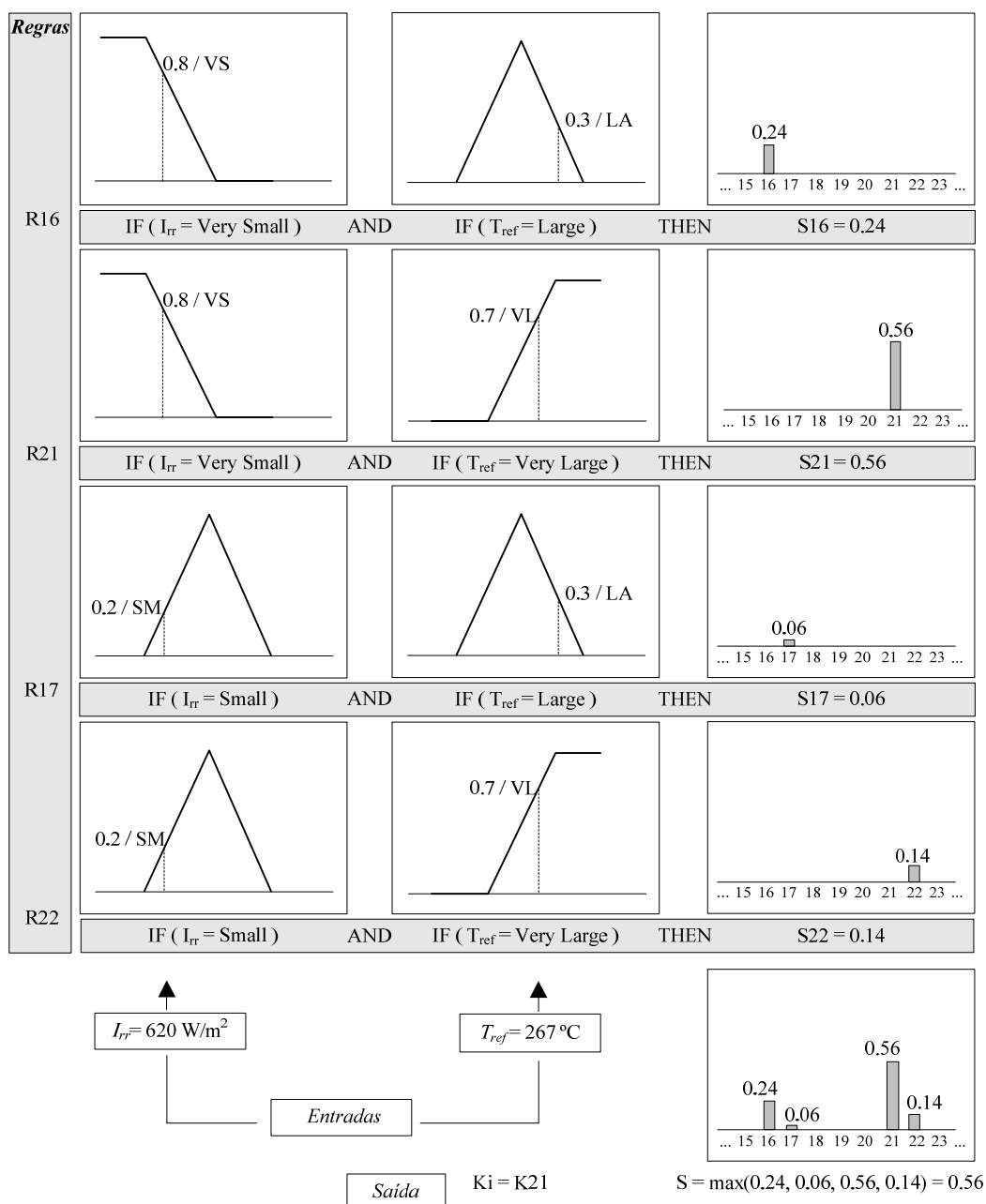


Figura 5.17: Exemplo do funcionamento do mecanismo difuso.

A agregação dos consequentes das regras determina o índice  $i$ , o qual permite identificar o controlador seleccionado, dado por  $\alpha_i = \max\{\alpha_1, \dots, \alpha_{25}\}$ . Este mecanismo, apesar de simples, provou na prática ser eficaz.

Caso dois controladores fiquem activos simultaneamente opta-se por aquele que apresentar um valor de pertença superior para a variável que representa a temperatura de referência,  $\mu_T^{(i)}(T_{ref})$ .

A Figura 5.17 (apresentada na página anterior) mostra um exemplo de aplicação da abordagem considerada para o caso particular de  $I_{rad} = 620\text{W/m}^2$  e  $T_{ref} = 267^\circ\text{C}$ . Aplicando o modelo difuso, o controlador seleccionado é o  $K_{21}$ .

### 5.3.3.2 Agrupamento

Para simplificar a tarefa do supervisor, aplicou-se a técnica de agrupamento *c-Means clustering* (Bezdek, 1981) aos controladores  $K_i$ ,  $i=1, \dots, 25$  (podendo ser interpretados como pontos no espaço tridimensional, ver Figura 5.18). O número de grupos considerados foi, neste caso particular,  $M = 7$ . Desta forma, o conjunto dos 25 controladores iniciais (símbolo  $+$  na Figura 5.18) foi reduzido a 7 (símbolo  $\circ$  na mesma figura).

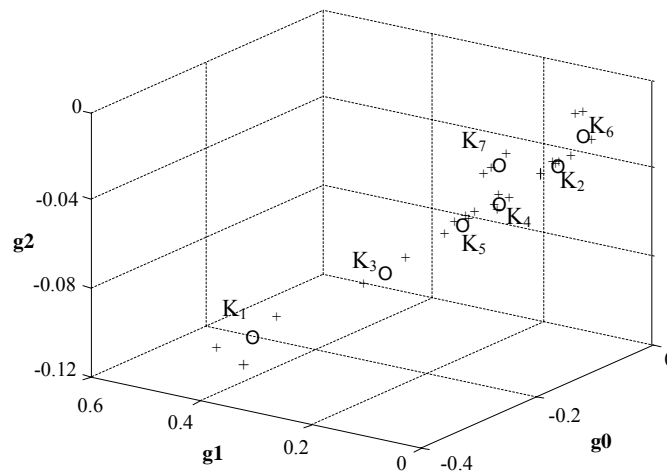


Figura 5.18: Agrupamento de controladores.

Uma vez reduzido o número de controladores, a base de regras pode ser simplificada, obtendo-se a representada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Base de regras simplificada.

		$I_{rad}$ Intensidade da Radiação Solar [ $W/m^2$ ]				
		600	700	800	900	1000
Temperatura de Referência [ $^{\circ}C$ ]	$T_{ref}$ 230	K5	K5	K2	K6	K6
	240	K5	K1	K5	K2	K2
	250	K7	K5	K1	K4	K2
	260	K7	K2	K4	K3	K4
	270	K6	K7	K1	K4	K3

### 5.3.4 Resultados

Os resultados apresentados correspondem às experiências realizadas nos dias 6 e 7 de Julho de 1998 (1ª visita à Plataforma Solar de Almería) e no dia 31 de Julho de 2002 (2ª visita). Na primeira visita, o algoritmo de controlo foi implementado na linguagem C, operando sobre um software específico desenvolvido na Plataforma (López, 1996), também em linguagem C. Na segunda visita o sistema de supervisão e controlo foi implementado em Matlab/Simulink tendo a comunicação com o sistema computadorizado de aquisição e de actuação, existente no local, sido realizada através da porta de comunicação série RS-232.

O sistema de controlo, neste caso, é constituído por controladores do tipo PID cujos parâmetros foram obtidos de tal forma que os pólos do sistema em malha fechada se localizassem em posições previamente definidas.

A eficácia da estratégia de supervisão foi previamente testada sobre um modelo não-linear de simulação, desenvolvido na Universidade de Sevilha (Berenguel *et al.*, 1993). Além disso, os resultados obtidos foram comparados com os de um controlador PID fixo. As experiências foram realizadas com o objectivo de verificar a validade do esquema de controlo nas seguintes condições: i) variação do modo de funcionamento, estabelecendo diversas temperaturas de referência; ii) capacidade de rejeição de perturbações na temperatura do óleo de entrada e na adição/supressão de operação de um dos ramais de colectores.

Considerou-se o período de amostragem de 15 segundos e a temperatura de saída,  $T_{out}$ , como a temperatura máxima de todos os ramais em operação (outra possibilidade seria considerar a temperatura média do óleo nos ramais).

Mostram-se agora os resultados obtidos com um controlador fixo do tipo PID (ver Figura 5.19) e com a estratégia proposta (Figura 5.20).

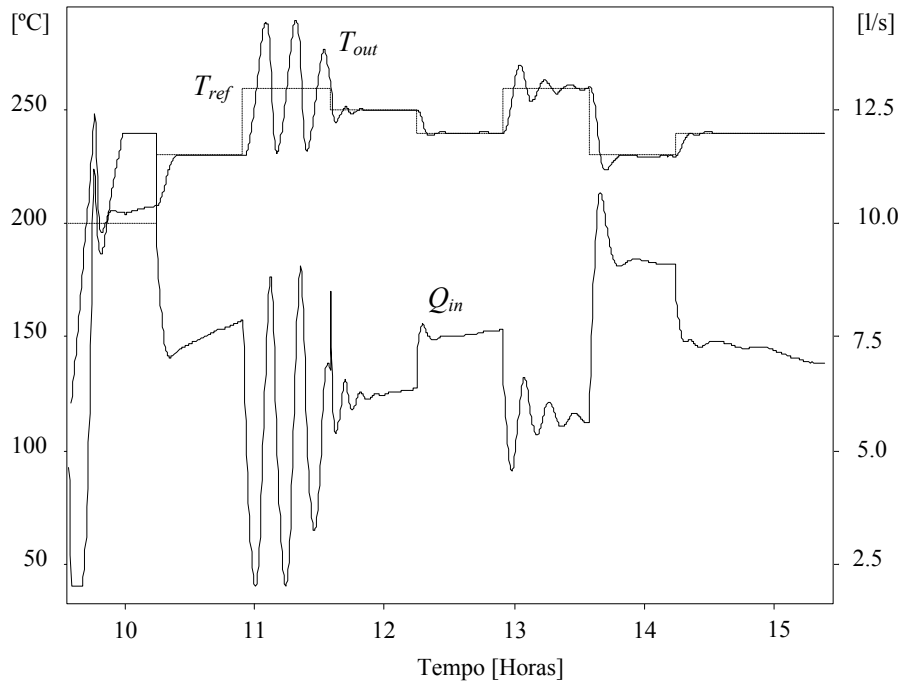


Figura 5.19: Simulação 1: comportamento do processo usando um controlador PID fixo ( $K5$ ).

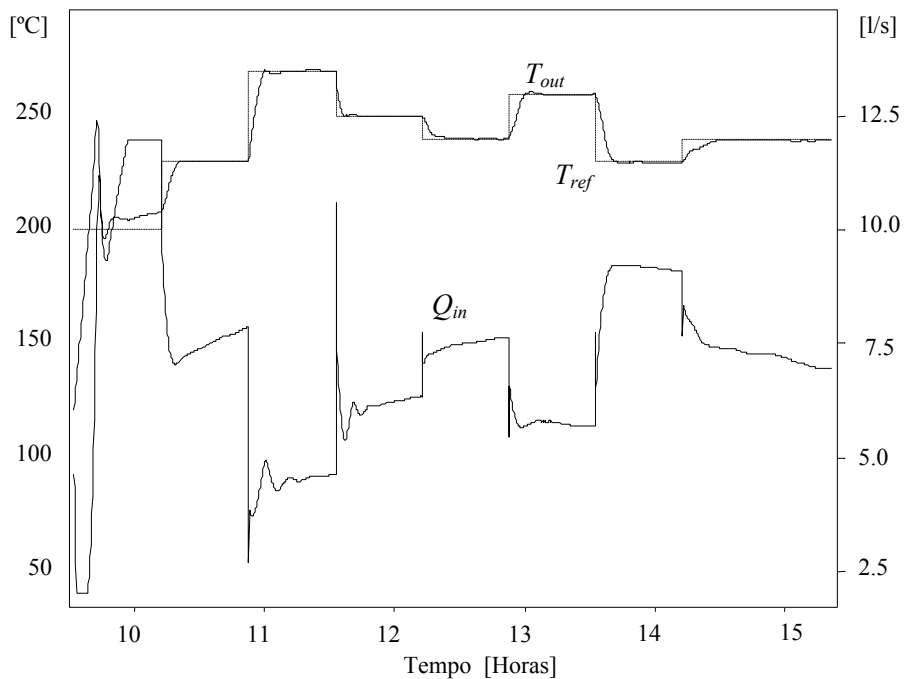


Figura 5.20: Simulação 2: comportamento do processo usando a estratégia de supervisão proposta.

O controlador fixo foi projectado de forma a garantir um desempenho satisfatório para o regime de operação definido por  $I_{rad} = 800 \text{ W/m}^2$  e  $T_{ref} = 240^\circ \text{C}$ , ou seja, utilizou-se o controlador  $K5$ . Os dados necessários para a realização da simulação ( $T_{in}$  e  $I_{rad}$ ) foram recolhidos no dia 6 de Julho de 1998.

A partir dos resultados pode-se verificar que o comportamento do sistema de controlo é satisfatório no modo de funcionamento para o qual foi projectado (aproximadamente das 10h10m até às 10h50m, das 12h15m até às 12h50m e das 14h10m até ao final da simulação). Contudo para outras condições de operação o seu comportamento deteriora-se claramente.

Por outro lado, usando a estratégia de supervisão proposta, o sistema de controlo mostra-se capaz de operar nos vários modos de funcionamento, seleccionando para cada um deles o controlador que melhor se adequa. Na Figura 5.21 mostra-se o controlador seleccionado, e a evolução da radiação solar.

A primeira experiência aqui apresentada foi realizada no dia 6 de Julho de 1998 e teve por objectivo testar o desempenho do sistema de supervisão face a variações no modo de funcionamento, impostas pelo estabelecimento de diversas temperaturas de referência (Figura 5.22). Ainda nesta experiência foi testada a capacidade de resposta do controlador a uma perturbação na temperatura de óleo de entrada, efectuada aproximadamente no instante 13h25m. Na Figura 5.23 são representadas a evolução da radiação solar e o controlador seleccionado em cada instante.

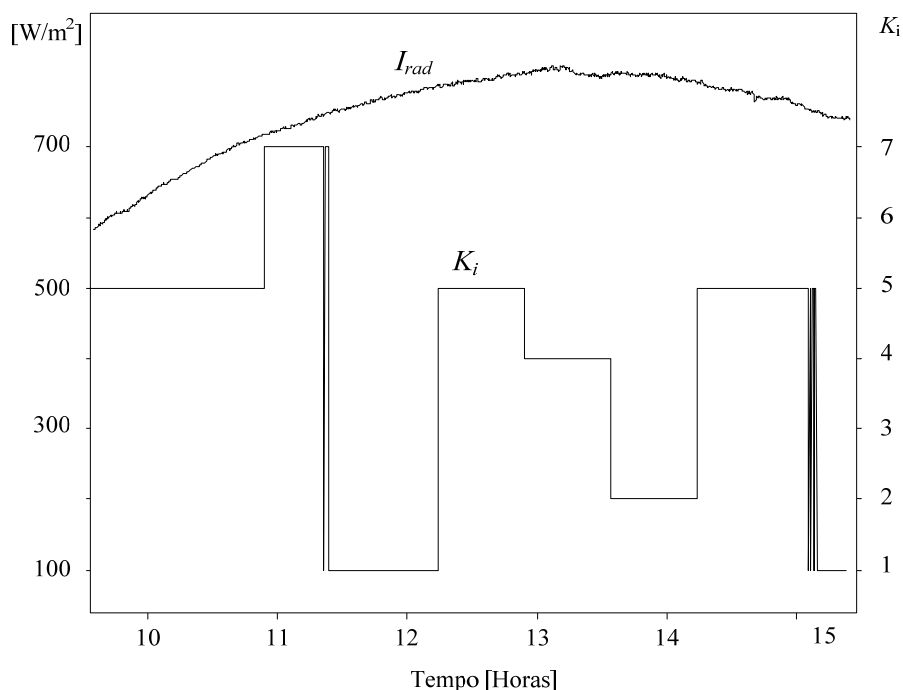


Figura 5.21: Simulação 2: evolução da radiação solar e do controlador seleccionado (6/Julho/1998).

Como pode ser observado pela Figura 5.22, o comportamento do sistema é bastante satisfatório, estabilizando, sensivelmente, ao fim de 15 minutos. A rejeição de perturbações pode também ser considerada aceitável. De referir que seria de esperar um erro nulo em regime estacionário pelo uso de um controlador PID. Contudo, isso não se verifica, por exemplo, no instante 12h10m. Tal facto é justificado pela evolução da radiação solar actuar como uma perturbação na carga (aproximadamente uma rampa).

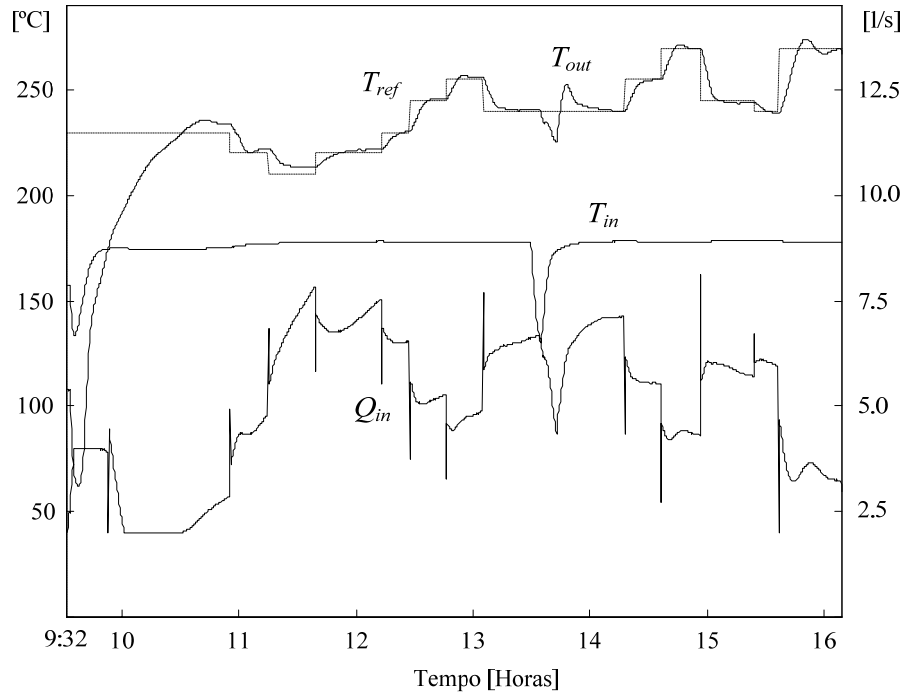


Figura 5.22: Experiência 1: resultados obtidos no dia 6 de Julho de 1998.

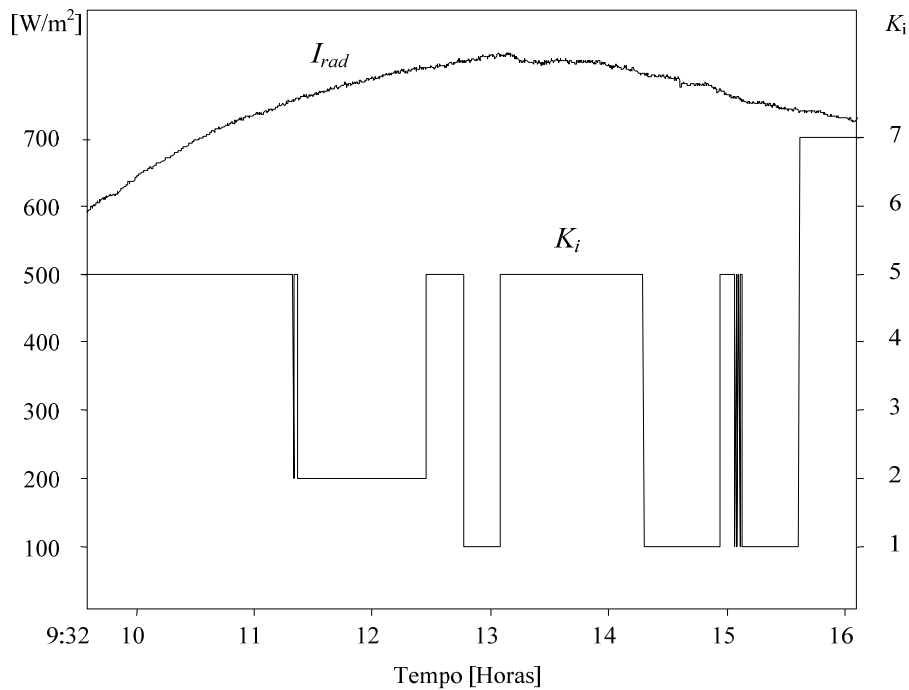


Figura 5.23: Experiência 1: radiação solar e controlador seleccionado (6/Julho/1998).

A segunda experiência, realizada no dia 7 de Julho de 1998, permitiu testar, além da variação nos modos de funcionamento, a supressão de um laço de colectores (instante 14h55m) e a sua posterior adição (instante 15h12m). Os resultados são apresentados nas Figura 5.24 e Figura 5.25.



Mais uma vez o esquema de controlo se mostrou eficaz, mesmo aquando da adição/supressão de um laço de operação.

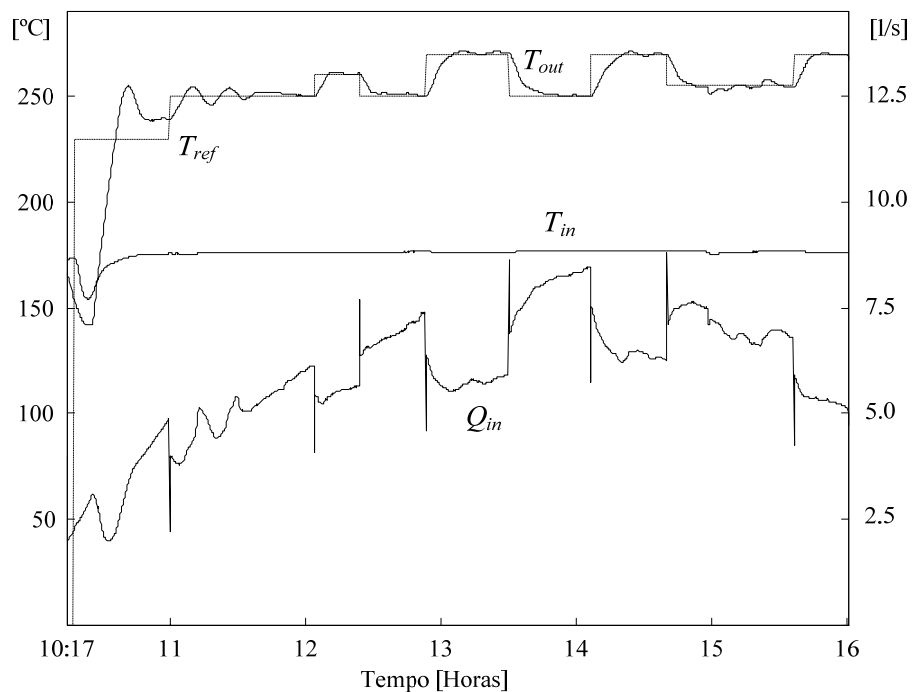


Figura 5.24: Experiência 2: resultados obtidos no dia 7 de Julho de 1998.

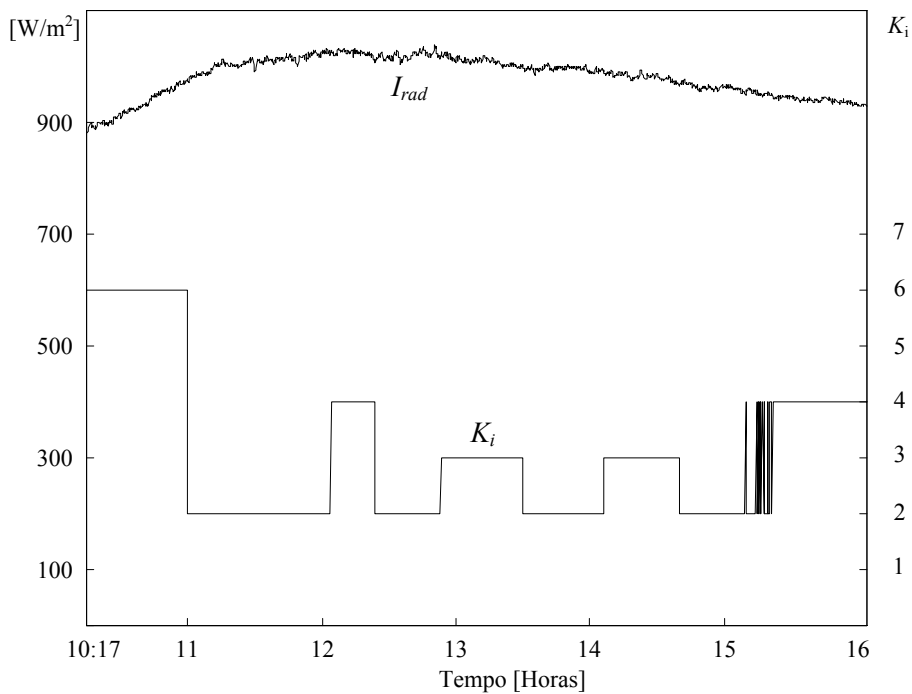


Figura 5.25: Experiência 2: radiação solar e controlador seleccionado (7 de Julho 1998).

Na terceira experiência realizada em 31 de Julho de 2002, considerou-se uma outra estratégia de controlo, tendo sido usado um sistema de controlo preditivo adaptativo baseado num modelo neuronal, incorporando um compensador de desvios estacionários (Gil *et al.*, 2003). A inclusão desta experiência neste trabalho tem como intenção mostrar a necessidade de utilização de sistemas com tolerância a falhas e perspectivar a utilização desta metodologia de controlo na formulação do sistema de controlo com tolerância activa a falhas. Os resultados são apresentados nas Figura 5.26 e Figura 5.27.

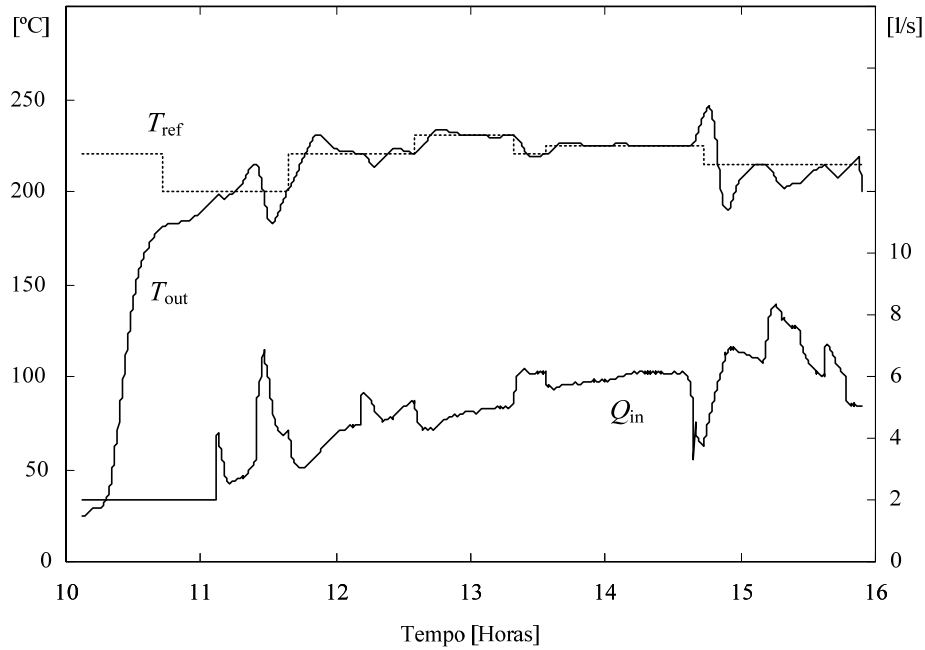


Figura 5.26: Experiência 3: resultados obtidos no dia 31 de Julho de 2002.

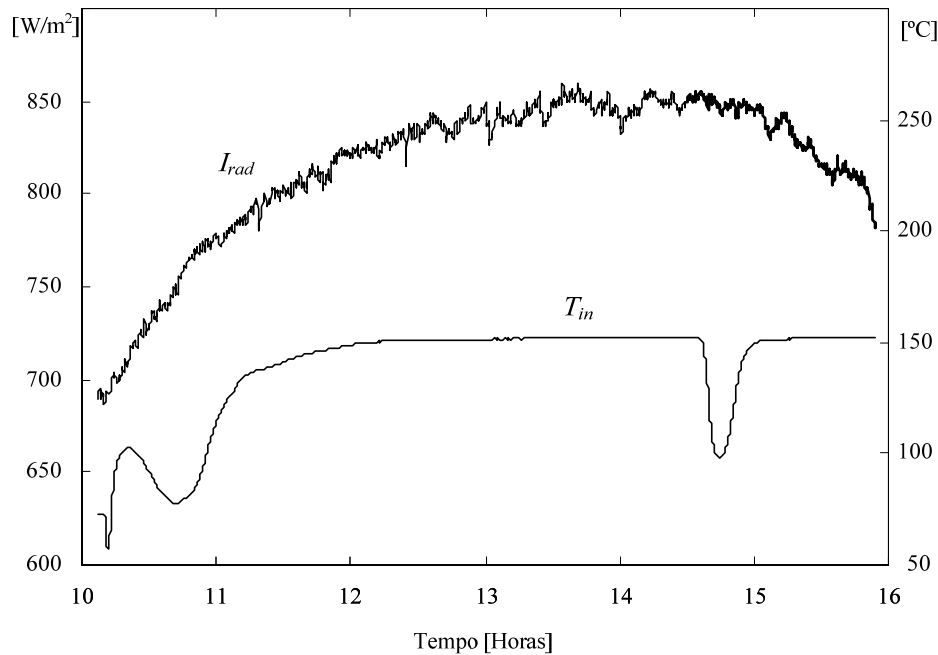


Figura 5.27: Experiência 3: Radiação solar e Temperatura do óleo à entrada (31/Julho/2002).

Para testar a robustez do sistema de controlo foram consideradas algumas perturbações e falhas. Assim, às 13h03m e às 13h07m, os ramais 6 e 4 foram, respectivamente, desconectados e às 13:53, os caudais nesses ramais foram restabelecidos. Das 14h36m às 15h03m introduziu-se uma perturbação na temperatura do óleo à entrada, com uma amplitude máxima de cerca de 50 °C. Às 15h10m foi injectada uma falha abrupta no sensor da temperatura do óleo à saída, com uma amplitude de +10°C e uma duração de 16 minutos. Às 15h37m foi injectada uma falha abrupta no sensor da temperatura do óleo à entrada com uma amplitude de +10°C, durante 9 minutos.

Como pode ser observado, a falha em componentes do processo (desconexão dos dois ramais) quase não teve efeito no desempenho do sistema em malha fechada. A perturbação na temperatura de entrada teve um impacto significativo no sistema.

Quanto às duas falhas nos sensores, ficou evidenciada a necessidade da inclusão do módulo de diagnóstico de falhas num sistema de controlo supervisionado, de forma a diagnosticar essas falhas e, caso seja possível, proceder à sua acomodação.

### **5.3.5 Análise do Desempenho do Sistema**

No Campo de Colectores Solares pretendeu-se, essencialmente, testar o mecanismo proposto para o módulo supervisor. Embora, só tenha sido usado para seleccionar o controlador adequado a cada modo de funcionamento, o bom desempenho do supervisor dá boas indicações sobre a sua potencial utilização na concretização das outras tarefas indicadas no capítulo 4.

Além disso, a consideração do projecto de controladores para os modelos associados a cada modo de funcionamento mostrou ser uma abordagem adequada a processos com características não lineares e com variância no tempo.

Os resultados obtidos, em particular na 3ª experiência, mostram a importância da consideração de abordagens de diagnóstico e de controlo com tolerância a falhas.

Dadas as características deste processo, teria sido interessante a implementação de parte substancial da arquitectura proposta para o sistema de supervisão e controlo. Espera-se numa próxima visita obter resultados que venham a consolidar as perspectivas de aplicabilidade da solução proposta.

## 5.4 Processo “Três Tanques”

Nesta secção apresentam-se alguns resultados da aplicação das metodologias de supervisão e controlo tolerante a falhas referidas nos capítulos anteriores, ao processo laboratorial “Três Tanques”. Este processo, embora seja laboratorial, apresenta características dinâmicas não lineares e um conjunto de componentes que possibilitam a introdução de vários tipos de falhas (em sensores, em actuadores e em componentes do próprio processo) e a consideração de cenários com redundância física de componentes e actuadores. Os resultados apresentados correspondem às situações de falha num sensor, de perturbação, através de uma fuga num tanque, e de falha num componente do processo, representado pelo entupimento da tubagem de ligação entre os dois tanques em uso. Estes testes pretenderam mostrar o desempenho de algumas das tarefas do sistema de supervisão.

### 5.4.1 Descrição do Processo

O processo laboratorial dos Três Tanques (*Three-Tank System*), referenciado por DTS200 pela empresa fabricante (Amira, 1996b), é um sistema multi-variável híbrido com um comportamento dinâmico não linear. Foi proposto no âmbito do programa de investigação COSY (*Control of Complex Systems*) da ESF (*European Science Foundation*) como um *benchmark* para a investigação em sistemas de supervisão e controlo com tolerância a falhas de sistemas dinâmicos reconfiguráveis (Heiming and Lunze, 1999; Lunze *et al.*, 2001).

O processo dos Três Tanques pode apresentar uma versão base, conforme a imagem apresentada na Figura 5.28a) (correspondente à versão utilizada nas experiências apresentadas neste trabalho), ou uma versão com tubagens de interligação e válvulas adicionais, como pode ser observado na imagem da Figura 5.28b).

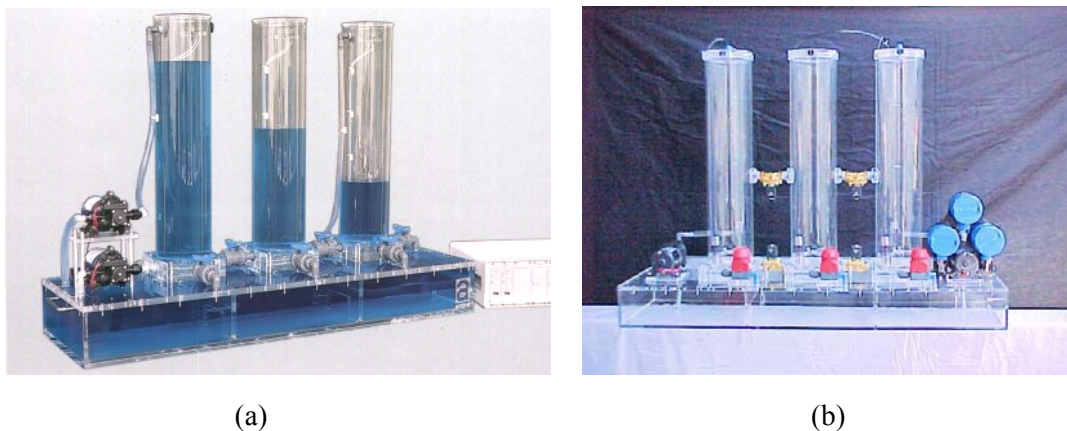


Figura 5.28: O processo laboratorial dos Três Tanques (*Three-Tank System*): a) versão base; b) versão mais completa, incluindo tubagens de interligação e válvulas adicionais.

Na definição do processo dos Três Tanques considerou-se a sua versão mais completa, procurando explorar uma maior redundância do sistema. Nas experiências laboratoriais apresentadas neste trabalho consideraram-se unicamente as situações compatíveis com a versão base, dado ser essa a existente no Laboratório.

O processo, ilustrado no diagrama da Figura 5.29 (correspondente à imagem apresentada na Figura 5.28b)), é constituído essencialmente pelos seguintes componentes:

- i) Três tanques (vasos cilíndricos) acoplados, denominados  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ ;
- ii) Duas bombas idênticas  $P_1$  e  $P_2$  que asseguram a alimentação directa, respectivamente, dos tanques  $T_1$  e  $T_2$  a partir do reservatório  $T_0$ ;
- iii) Três transdutores para a medição contínua dos níveis do líquido (usualmente água) em cada tanque ( $h_1$ ,  $h_2$  e  $h_3$ );
- iv) Tubagens de secção circular que interligam os três tanques junto à sua base, equipadas com válvulas ( $v_{13}$  e  $v_{23}$ );
- v) Tubagens que interligam os três tanques a uma altura intermédia  $h''$ , equipadas com válvulas ( $v''_{13}$  e  $v''_{23}$ );
- vi) Tubagens que interligam cada um dos três tanques com o reservatório  $T_0$ , dotadas de válvulas junto à base dos tanques ( $v_{30}$ ,  $v_{20}$ ,  $v_{1L}$  e  $v_{2L}$ ).

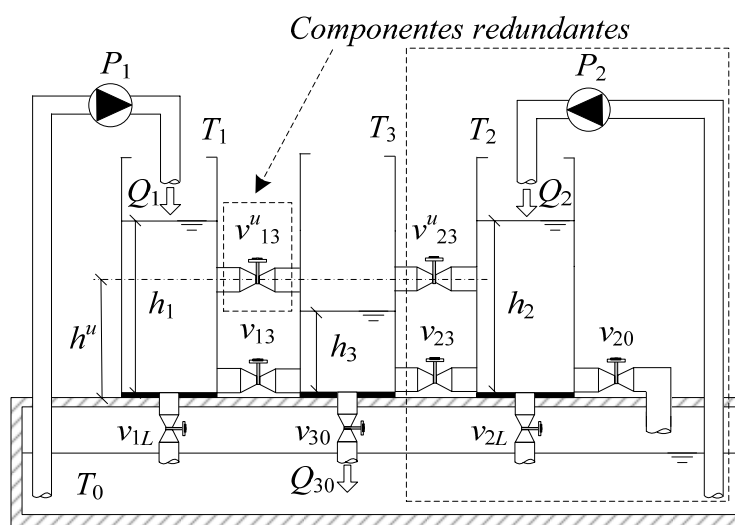


Figura 5.29: Representação esquemática do processo dos Três Tanques.

A existência das várias válvulas no processo possibilita o estabelecimento de diversas configurações de funcionamento (usando as válvulas  $v_{13}$ ,  $v_{23}$ ,  $v''_{13}$ ,  $v''_{23}$ ,  $v_{30}$  e  $v_{20}$ ) e a consideração de situações de falha como fugas nos tanques (usando as válvulas  $v_{1L}$  e  $v_{2L}$ ) ou obstruções nas tubagens. Neste trabalho, a configuração nominal do processo considera unicamente os tanques da esquerda ( $T_1$ ) e do meio ( $T_3$ ), a bomba  $P_1$ , as válvulas  $v_{13}$  e  $v_{30}$  totalmente abertas e as restantes válvulas completamente fechadas. O tanque da direita ( $T_2$ ) e as válvulas de interligação que lhe estão associadas ( $v_{23}$ ,  $v''_{23}$  e  $v_{20}$ ), a bomba  $P_2$  e a válvula de interligação  $v''_{13}$  são considerados componentes redundantes.

O principal objectivo do processo consiste em garantir um determinado caudal do líquido  $Q_{30}$  na tubagem de saída (com a válvula  $v_{30}$ ) do tanque  $T_3$ . Para que este objectivo seja atingido, o nível do líquido no tanque  $T_3$ ,  $h_3$ , deve ser mantido num valor de referência correspondente ao valor desejado para o caudal  $Q_{30}$ . Na situação nominal, o tanque  $T_1$  é abastecido pela bomba  $P_1$  com um caudal  $Q_1$ , fluindo o líquido entre este tanque e o tanque  $T_3$  através da tubagem com a válvula  $v_{13}$ . Deste modo, o nível do tanque  $T_3$  só pode ser controlado de uma forma indirecta através do tanque adjacente.

O facto do processo apresentar simetria relativamente ao tanque do meio, facilita a tarefa de reconfiguração, tomando decisões sobre a abertura ou o fecho das válvulas existentes nas tubagens de interligação desse tanque com os tanques adjacentes.

O sistema nominal, conforme o diagrama da Figura 5.30, é caracterizado por duas saídas mensuráveis, os níveis de líquido nos tanques  $T_1$  e  $T_3$ ,  $h_1$  e  $h_3$ , sujeitas a falhas,  $f_{s1}$  e  $f_{s2}$ , e a ruído,  $n_1$  e  $n_2$ , respectivamente, por uma entrada controlável, o caudal de entrada fornecido pela bomba  $P_1$ ,  $Q_1$ , sujeita a falhas,  $f_a$ , por perturbações (por exemplo, uma fuga de líquido num tanque),  $p$ , e falhas em componentes do processo,  $f_c$  (por exemplo, o entupimento parcial de uma tubagem).

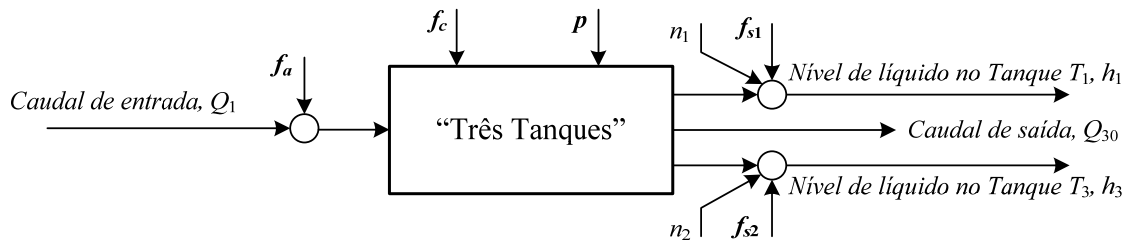


Figura 5.30: Diagrama do processo “Três Tanques”.

#### 5.4.1.1 Calibração

No caso do processo laboratorial dos Três Tanques, a interface é efectuada através de três transdutores associados ao nível do líquido em cada tanque, de dois actuadores associados às bombas de alimentação dos tanques e das válvulas existentes nas diversas tubagens.

Os transdutores convertem o nível do líquido em cada tanque, medido por sensores de pressão diferencial (relativamente à pressão atmosférica) piezoresistivos, localizados na base de cada tanque, em sinais eléctricos de saída que variam em tensão numa gama entre -10V e +10V, sendo a correspondência entre o valor do nível e o sinal em tensão em oposição (-10V corresponde a 0.7245m e +10V corresponde a 0m).

As bombas de diafragma de três secções com pistão de curso fixo apresentam um fluxo por rotação bem definido e são actuadas por motores de corrente contínua (DC). Cada motor DC recebe um sinal eléctrico em tensão numa gama entre -10V e +10V, actuando sobre a respectiva bomba de forma a garantir uma variação do caudal debitado entre zero e um valor máximo nominal, sendo a correspondência directa (-10V corresponde a  $0\text{m}^3\text{s}^{-1}$  e +10V corresponde a  $1 \times 10^{-4}\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ). As válvulas associadas às tubagens do processo podem ser actuadas manualmente ou através de actuadores eléctricos com saída on/off (válvula totalmente aberta/fechada) ou com saída de variação contínua.

Relativamente à comunicação entre a instrumentação do processo e o computador digital (PC) foi usado o equipamento de acondicionamento de sinal fornecido com o processo e uma placa de aquisição e de actuação - AD512 (Humusoft, 1997) com um conversor analógico/digital (ADC) de 12 bits a 100KHz e dois conversores digital-analógicos (DAC) com uma resolução de 12 bits. O *driver* da placa utiliza a *Extended Real Time Toolbox* para o Matlab/Simulink (Humusoft, 1999). Para a aquisição foram usados canais de entrada da placa na gama entre -10V e +10V com um ganho do amplificador igual a 1. Os valores digitais obtidos através do *driver* da placa variam entre -1 e 1 com uma correspondência directa com os valores em tensão. Para a actuação sobre o processo, foram considerados os dois canais de saída da placa na gama entre -10V e +10V, correspondendo de uma forma directa à variação entre -1 e 1 dos valores digitais enviados ao *driver* da placa.

A operação de calibração de todo o sistema de aquisição e de actuação deverá assegurar um mapeamento correcto entre os valores das grandezas físicas e os valores digitais correspondentes, considerando a selecção de um ganho para o sistema de aquisição que garanta a maximização da resolução do valor digital.

Aplicando as equações (5.1) e (5.2), obtêm-se as seguintes equações de calibração:

$$h = -0.3623(hd - 1.0) \quad \text{e} \quad Qd = 2.0 \times 10^4 \times Q - 1.0 \quad (5.28)$$

Procedendo à identificação experimental das equações de calibração que caracterizam a aquisição do nível do líquido (em m) em cada tanque e a actuação sobre cada bomba que controla o caudal de líquido (em  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) que entra nos tanques, obteve-se:

$$\begin{aligned} h_1 &= -0.3589 \times hd_1 + 0.3655 \\ h_2 &= -0.3520 \times hd_2 + 0.3353 \\ h_3 &= -0.3529 \times hd_3 + 0.3482 \end{aligned} \quad \text{e} \quad \begin{aligned} Qd_1 &= 2.0074 \times 10^4 \times Q_1 - 1.0 \\ Qd_2 &= 2.0079 \times 10^4 \times Q_2 - 1.0 \end{aligned} \quad (5.29)$$

Comparando as equações de calibração (5.28) e (5.29), conclui-se que, embora não existam diferenças significativas, a identificação experimental permitiu obter equações mais próximas das relações reais.

### 5.4.2 Modelo do processo

Do ponto de vista teórico, o processo dos Três Tanques representa um sistema híbrido típico, apresentando uma dinâmica não linear. As não linearidades devem-se, essencialmente, ao facto do caudal volúmico de líquido entre vasos comunicantes estar relacionado com a raiz quadrada da diferença de níveis em cada vaso e com a perda de carga na tubagem de interligação, que é função do quadrado da velocidade de escoamento.

Dependendo dos níveis do líquido nos tanques e da posição das diversas válvulas, podem-se obter diferentes modelos não lineares no espaço de estados.

Assumindo que o nível do líquido nos tanques  $T_i$  e  $T_j$  não é inferior à altura a que se encontra a tubagem de interligação entre esses tanques, o caudal volúmico  $Q_{ij}$  [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ] do líquido que flui entre esses tanques pode ser calculado usando a lei de Torricelli de acordo com a expressão:

$$Q_{ij} = v_{ij} k_{ij} S_{ij} \operatorname{sgn}(h_i - h_j) \sqrt{2g|h_i - h_j|} \quad (5.30)$$

onde  $v_{ij}$  representa o posicionamento da válvula associada à tubagem com um valor adimensional entre 0 (válvula totalmente fechada) e 1 (válvula totalmente aberta),  $k_{ij}$  o coeficiente de escoamento adimensional associado à tubagem com a válvula  $v_{ij}$ ,  $S_{ij}$  [ $\text{m}^2$ ] a área da secção transversal da tubagem de conexão entre os tanques  $T_i$  e  $T_j$ ,  $\operatorname{sgn}(\cdot)$  a função sinal,  $g$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ] a aceleração da gravidade e  $h_i, h_j$  [ $\text{m}$ ] os níveis do líquido nos tanques  $T_i$  e  $T_j$ , respectivamente, cujo valor poderá variar entre 0 e um valor máximo  $h_{max}$ .

Aplicando a lei da conservação da massa, a variação do volume  $V_i$  [ $\text{m}^3$ ] do líquido no tanque  $T_i$  pode ser obtido através da expressão:

$$\dot{V}_i = S_i \dot{h}_i = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \quad (5.31)$$

onde  $S_i$  [ $\text{m}^2$ ] representa a área da secção transversal do tanque  $T_i$  e  $\sum Q_{in}, \sum Q_{out}$  a soma de todos caudais volúnicos dos fluidos que entram e que saem do tanque  $T_i$ , respectivamente.

O modelo matemático global do processo pode ser obtido a partir das equações diferenciais não lineares associadas aos três tanques, dadas por:

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = \frac{1}{S_1} (Q_1 - Q_{13} - Q_{13}^u - Q_{1L}) \\ \dot{h}_3 = \frac{1}{S_3} (Q_{13} + Q_{13}^u + Q_{23} + Q_{23}^u - Q_{30}) \\ \dot{h}_2 = \frac{1}{S_2} (Q_2 - Q_{23} - Q_{23}^u - Q_{2L} - Q_{20}) \end{cases} \quad (5.32)$$

onde  $Q_{ij}, Q_{ij}^u$  e  $Q_{iL}$  [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ] com  $i, j \in \{0, 1, 2, 3\}$ , representam o caudal volúmico do fluido nas tubagens com as válvulas  $v_{ij}, v_{ij}^u$  e  $v_{iL}$ , respectivamente, e  $Q_1, Q_2$  [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ] o caudal volúmico gerado pelas bombas  $P_1$  e  $P_2$ , respectivamente, cujo valor poderá variar entre 0 e um valor máximo  $Q_{max}$ .



Os diversos caudais volúmicos dos fluidos nas tubagens com as respectivas válvulas dependem fundamentalmente dos níveis do líquido nos tanques e do posicionamento das válvulas e são dados pelas expressões:

$$\begin{aligned}
 Q_{13} &= v_{13} k_{13} S_{13} \operatorname{sgn}(h_1 - h_3) \sqrt{2g|h_1 - h_3|} \\
 Q_{13}^u &= v_{13}^u k_{13}^u S_{13}^u \operatorname{sgn}(\max(h_1, h^u) - \max(h_3, h^u)) \sqrt{2g|\max(h_1, h^u) - \max(h_3, h^u)|} \\
 Q_{1L} &= v_{1L} k_{1L} S_{1L} \sqrt{2gh_1} \\
 Q_{30} &= v_{30} k_{30} S_{30} \sqrt{2gh_3} \\
 Q_{23} &= v_{23} k_{23} S_{23} \operatorname{sgn}(h_2 - h_3) \sqrt{2g|h_2 - h_3|} \\
 Q_{23}^u &= v_{23}^u k_{23}^u S_{23}^u \operatorname{sgn}(\max(h_2, h^u) - \max(h_3, h^u)) \sqrt{2g|\max(h_2, h^u) - \max(h_3, h^u)|} \\
 Q_{2L} &= v_{2L} k_{2L} S_{2L} \sqrt{2gh_2} \\
 Q_{20} &= v_{20} k_{20} S_{20} \sqrt{2gh_2}
 \end{aligned} \tag{5.33}$$

Admitindo que os níveis de líquido nos tanques são não nulos, os caudais indicados podem apresentar um valor nulo desde que a respectiva válvula se encontre na posição fechada (coeficiente  $v$  com o valor 0) ou, no caso dos caudais nas tubagens à altura  $h^u$ , os níveis do líquido nos tanques interligados por essa tubagem não forem, simultaneamente, superiores a essa altura.

Na Tabela 5.5 são apresentados os valores dos parâmetros que caracterizam o processo dos Três Tanques.

Tabela 5.5: Valores dos parâmetros fundamentais do processo “Três Tanques”.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Área da secção transversal dos tanques $T_1$ , $T_2$ e $T_3$	$S_1$ , $S_2$ e $S_3$	0.0154 m <sup>2</sup>
Área da secção transversal das várias tubagens	$S_{ij}$ , $S_{ij}^u$ e $S_{iL}$ $i, j \in \{0, 1, 2, 3\}$	$5 \times 10^{-5}$ m <sup>2</sup>
Aceleração da gravidade	$g$	9.81 m.s <sup>-2</sup>
Caudal volúmico máximo debitado pelas bombas $P_1$ e $P_2$	$Q_{max}$	$1 \times 10^{-4}$ m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Nível máximo do líquido nos tanques $T_1$ , $T_2$ e $T_3$	$h_{max}$	0.63 m
Altura das tubagens com as válvulas $v_{13}^u$ e $v_{23}^u$	$h^u$	0.3 m

Os resultados apresentados consideram uma configuração nominal com a bomba  $P_1$  a controlar o caudal de entrada  $Q_1$ , a tubagem na parte inferior dos tanques  $T_1$  e  $T_3$  com a válvula  $v_{13}$  aberta, a tubagem intermédia com a válvula  $v_{13}^u$  fechada, a tubagem com a válvula  $v_{1L}$  fechada e a tubagem de saída com a válvula  $v_{30}$  aberta, localizada no tanque  $T_3$ .

O principal objectivo para o sistema em malha fechada é manter o nível de líquido no tanque  $T_1$ ,  $h_1$ , na vizinhança de uma referência, controlando o caudal de entrada  $Q_1$  com a bomba  $P_1$ . Para obter um modelo linear do processo, efectuou-se a linearização do modelo não-linear em torno do modo de funcionamento nominal principal, definido por  $h_1=0.4\text{m}$ ,  $h_3=0.2\text{m}$  e  $h_2=0.4\text{m}$ .

### 5.4.3 Supervisão e Controlo Tolerante a Falhas

O processo “Três Tanques” é representado por um modelo linear com incertezas e apresenta componentes redundantes (tanque  $T_2$  e bomba  $P_2$ ) que permitem efectuar acções de reconfiguração. As falhas a considerar são no actuador ( $f_a$ ), nos sensores ( $f_{s1}$  e  $f_{s2}$ ) e nos componentes do sistema ( $f_c$ ). O problema de controlo robusto tolerante a falhas usa a abordagem proposta no Capítulo 3, sendo os objectivos formulados em  $\mathcal{H}_\infty$ .

Os objectivos para o projecto do sistema de controlo generalizado são os seguintes:

- i) A saída com a medida do nível no tanque  $T_1$  ( $y_1$ ) deve seguir a referência correspondente ( $ref$ );
- ii) As saídas devem ser insensíveis ao ruído e a falhas;
- iii) A acção de controlo nas altas frequências deve ser restringida, evitando variações demasiado bruscas;
- iv) Os resíduos  $r_1$ ,  $r_2$  e  $r_3$ , devem ser representativos das falhas no actuador  $f_a$  e nos sensores  $f_{s1}$  e  $f_{s2}$ , respectivamente, tendo em vista a sua detecção e isolamento.
- v) Estes objectivos devem verificar-se com a presença de incerteza de norma limitada  $\Delta$ .

A estrutura usada para a aplicação da análise e síntese  $\mu$ , é semelhante à considerada no caso do “Pêndulo Invertido” (representada na Figura 5.7) onde o processo aumentado  $P$  foi definido considerando as funções de transferência de ponderação que descrevem os objectivos e a ponderação dos sinais de entrada.

A configuração considera as entradas externas  $w_p$  que incluem o ruído nos valores medidos por cada sensor ( $n_1$  e  $n_2$ ) e a referência para o nível de líquido no tanque  $T_1$  ( $ref$ ). As falhas a considerar ( $f_a$ ,  $f_{s1}$ ,  $f_{s2}$ ) são representadas pela variável de entrada  $w_f$ . Os objectivos de desempenho e de detecção de falhas correspondem aos sinais externos de saída  $z_p$  e  $z_f$ , respectivamente. As entradas do controlador generalizado são a referência para o nível de líquido no tanque, as duas saídas do processo nominal ( $y_1=h_1$  e  $y_3=h_3$ ) e as saídas estimadas ( $\hat{y}_1$  e  $\hat{y}_3$ ) geradas pelo observador. Relativamente às saídas, o controlador generalizado gera a acção de controlo ( $u$ ) e os resíduos ( $r$ ).

### 5.4.3.1 Síntese do Controlador e do Módulo de Diagnóstico

Para enquadrar o problema de controlo e detecção de falhas numa formulação em  $H_\infty$  adequada à síntese  $\mu$ , representou-se a incerteza,  $\Delta$ , por uma perturbação limitada na sua norma e por uma função de transferência de ponderação. As especificações para o sistema em malha fechada foram igualmente expressas no domínio da frequência como funções de transferência de ponderação. A selecção destas funções, baseada no procedimento proposto no capítulo 3, teve em consideração a descrição da incerteza e as especificações de desempenho e de diagnóstico de falhas.

O controlador generalizado (controlador e módulo de diagnóstico) obtido para o processo “Três Tanques”, resultou da aplicação da metodologia de síntese  $\mu$ , proposta no Capítulo 3.

### 5.4.3.2 Sistema de Supervisão

Considerando, fundamentalmente, os módulos supervisor e de reconfiguração propostos no capítulo 4, definiram-se os seguintes objectivos para o sistema de supervisão e controlo do processo “Três Tanques”:

- i) Proceder à identificação das falhas em sensores e em componentes do processo, usando os resíduos gerados pelo controlador generalizado;
- ii) Quando for diagnosticada uma falha nos sensores, efectuar a sua acomodação usando o sensor virtual do módulo de reconfiguração;
- iii) Ajustar os objectivos definidos através do sinal de referência sempre que existam falhas em componentes do sistema que alterem a relação entrada-saída em regime estacionário;
- iv) Avaliar a robustez e o desempenho do sistema em situações com perturbações.

### 5.4.4 Resultados Obtidos

O sistema de supervisão e controlo com tolerância a falhas foi aplicado ao processo dos “Três Tanques”, usando o Simulink como ambiente de suporte.

As falhas consideradas foram aplicadas entre  $t=600s$  e  $t=1200s$ , para todos os casos.

Na primeira situação, representada na Figura 5.31, foi considerada uma falha aditiva na saída do sensor que mede o nível do líquido no tanque  $T_1$ ,  $y_1$ . Sem a acção de supervisão, o nível real do tanque  $h_1$  é erradamente controlado, dado que o sistema de controlo usa a saída do sensor com a falha.

Com a identificação da falha pelo módulo de diagnóstico de falhas, o supervisor desencadeia uma acção correctiva que, neste caso, corresponde à reconfiguração do sistema usando o sensor virtual. Essencialmente, a saída do sensor com falha é substituída por uma estimação à custa da restante informação disponível.

A Figura 5.32 mostra o resultado da acção do sistema de supervisão e controlo, evidenciando a acomodação da falha no sensor.

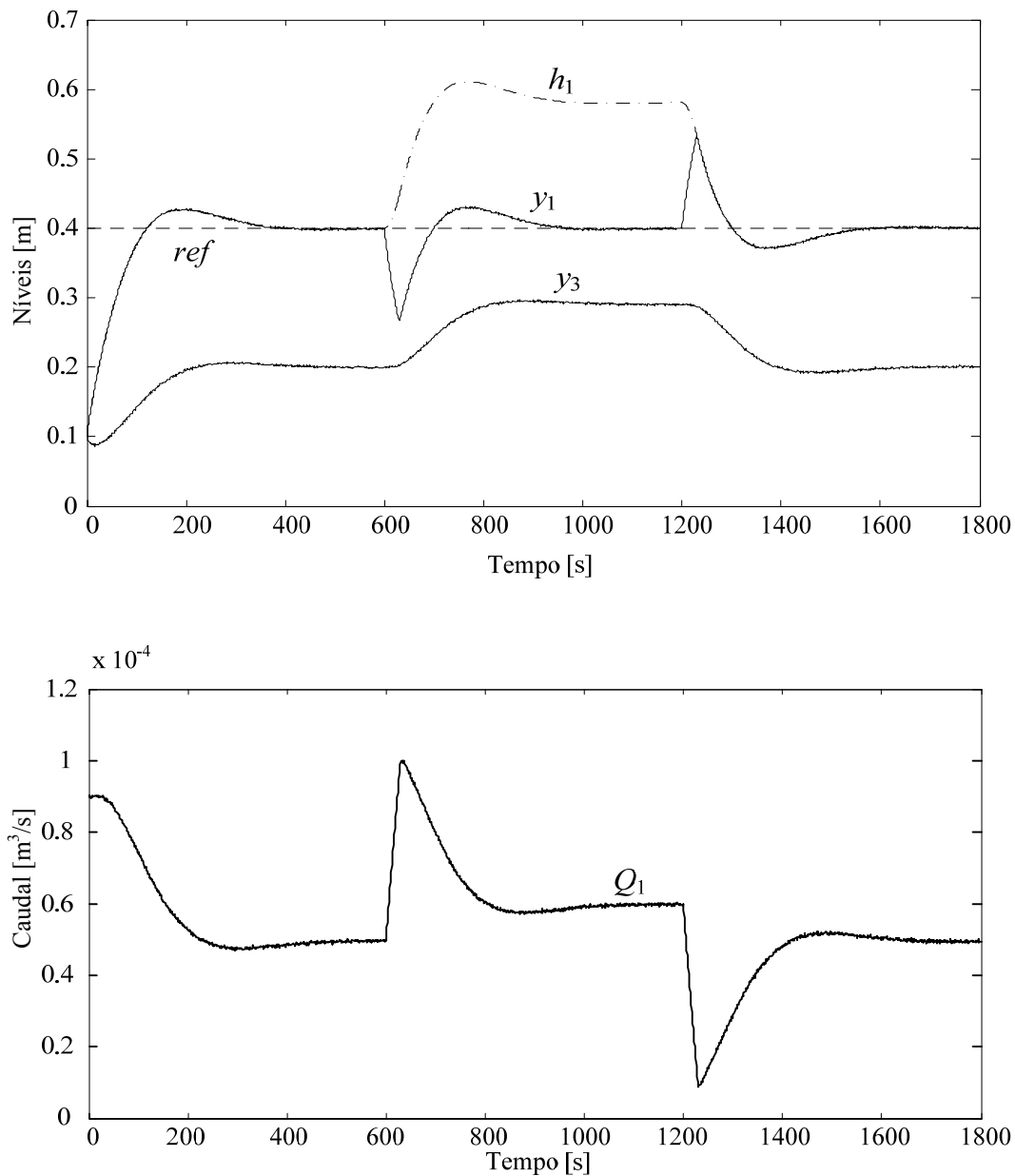


Figura 5.31: Três Tanques em malha fechada (sem FTC): entrada e saídas com falha no sensor.

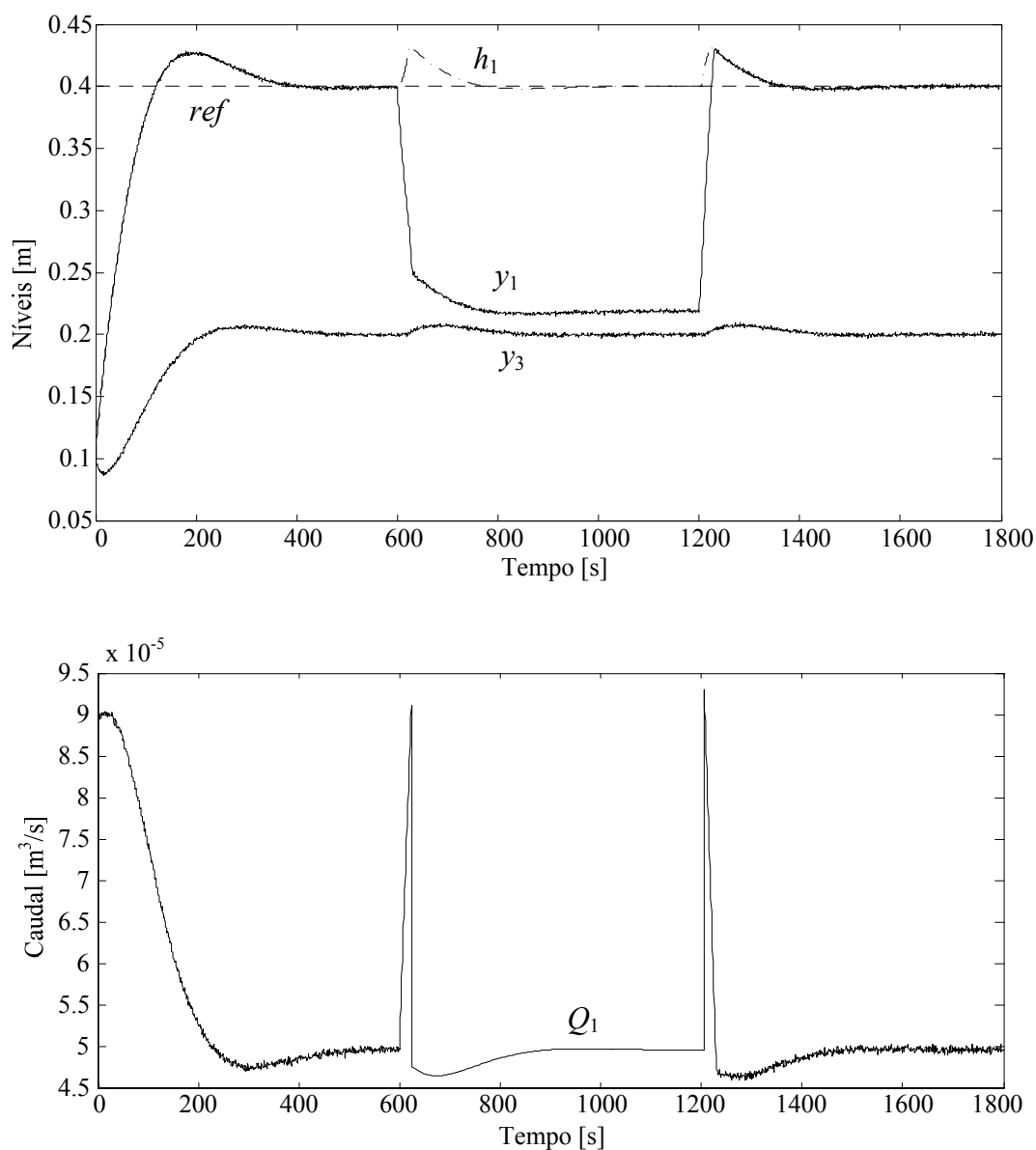


Figura 5.32: Três Tanques em malha fechada (com FTC): entrada e saídas com falha no sensor.

O segundo caso trata a situação de uma fuga no tanque  $T_1$ . O sistema de controle permite a acomodação da falha, compensando a falha com o aumento do caudal de entrada  $Q_1$  (Figura 5.33). Se a falha não for considerada aceitável, o supervisor tomará a decisão de reconfigurar o processo, comutando entre o tanque  $T_1$  e o tanque  $T_2$  com a respectiva bomba  $Q_2$ .

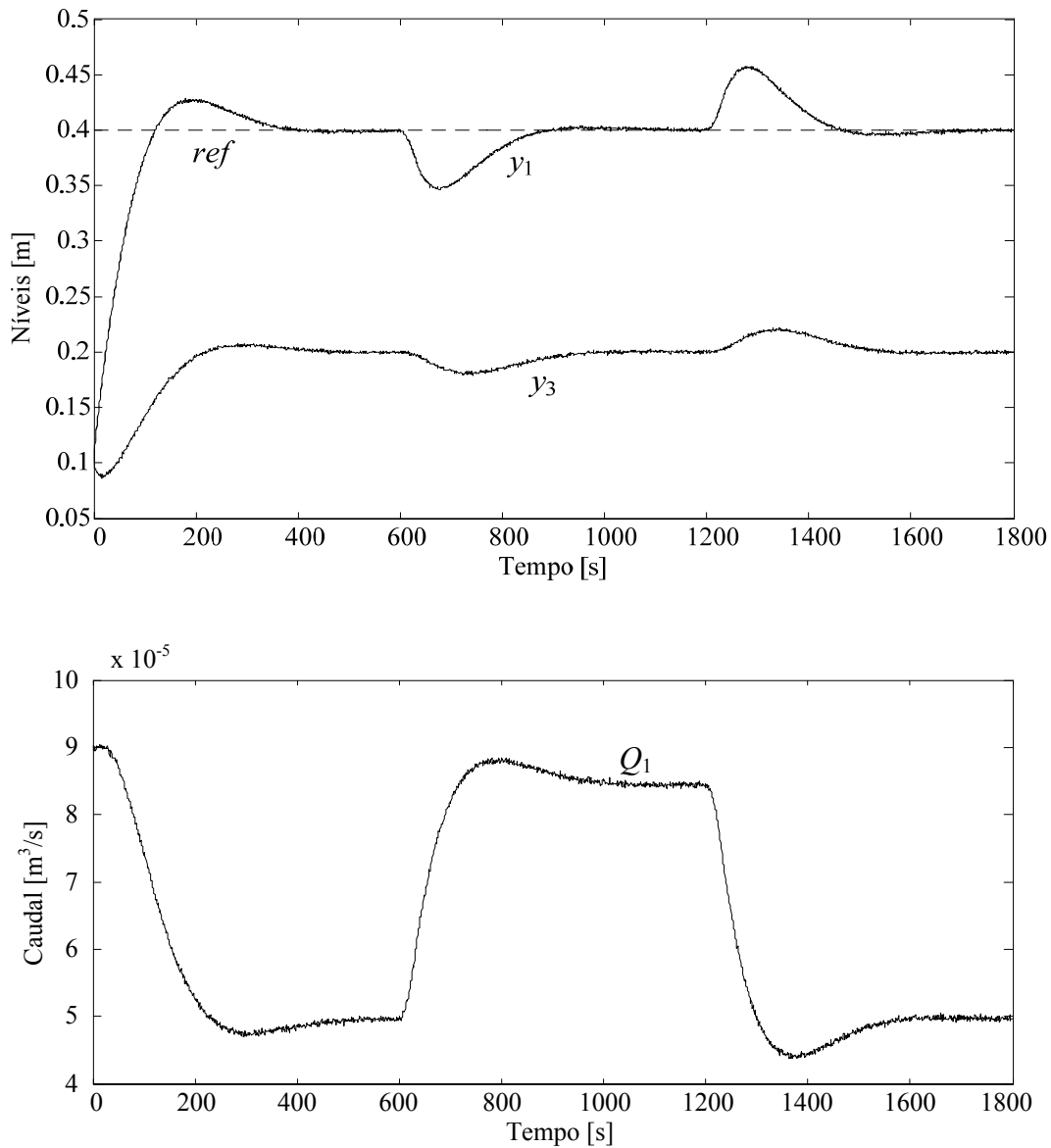


Figura 5.33: Três Tanques em malha fechada (sem reconfiguração): entrada e saídas com falha num componente (fuga no tanque  $T_1$ ).

A terceira situação corresponde ao entupimento parcial da tubagem com a válvula  $v_{13}$ . (falha num componente do processo). Sem a intervenção do supervisor, o nível de líquido no tanque  $T_1$ ,  $h_1$ , segue a referência mas o nível de líquido no tanque  $T_3$  baixa, devido à redução do caudal de líquido na transferência entre os dois tanques, provocada pelo entupimento (ver Figura 5.33).

Para solucionar este problema, depois da identificação da falha, o supervisor decide alterar (aumentar, neste caso) o sinal de referência para que o nível no tanque  $T_3$  atinja o valor pretendido (ver Figura 5.34).

No caso em que o entupimento resultar no bloqueio total da tubagem com a válvula  $v_{13}$ , o supervisor decidirá a reconfiguração do processo, abrindo a válvula  $v_{i13}$  associada à tubagem intermédia existente entre os tanques  $T_1$  e  $T_3$ .

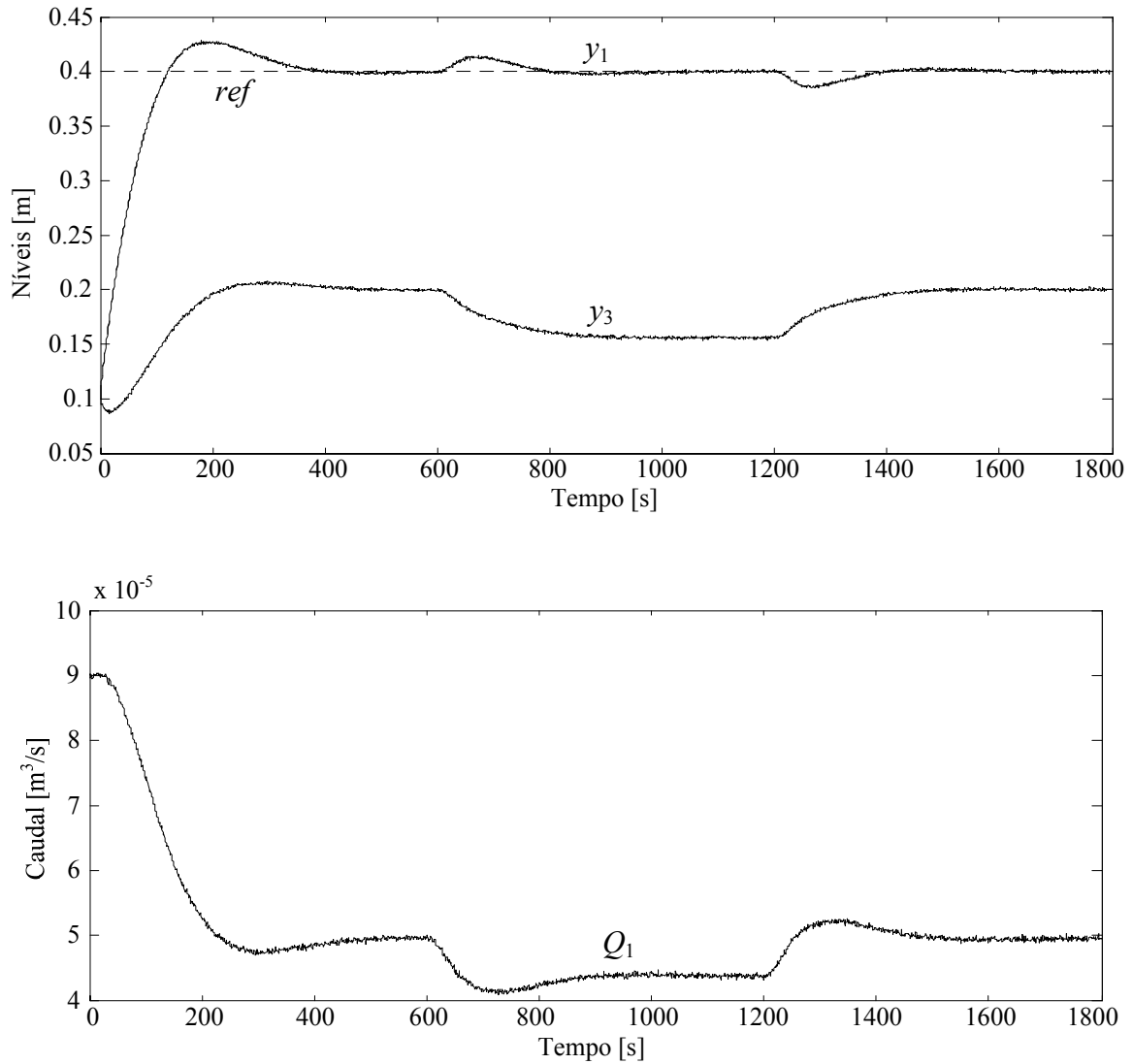


Figura 5.34: Três Tanques em malha fechada (sem FTC): entrada e saídas com falha num componente (entupimento parcial da tubagem com a válvula  $v_{13}$ ).

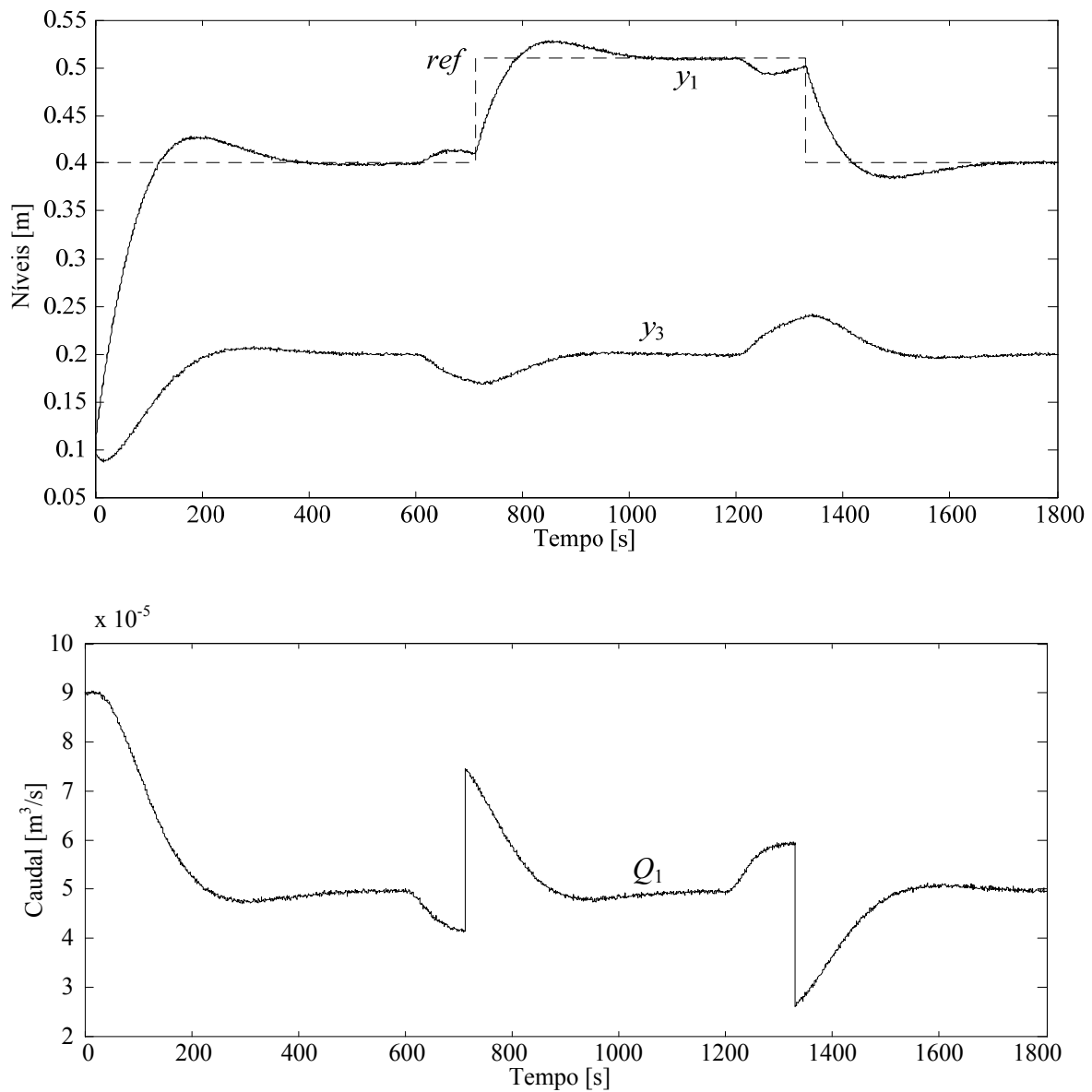


Figura 5.35: Três Tanques em malha fechada (com FTC): entrada e saídas com falha num componente (entupimento parcial da tubagem com a válvula  $v_{13}$ ).

### 5.4.5 Análise do Desempenho do Sistema

No processo “Três Tanques” consideraram-se, essencialmente, as situações de falha em sensores e em componentes do processo e o efeito de uma perturbação.

Os resultados obtidos evidenciaram a importância da existência de um sistema de supervisão e controlo com tolerância a falhas. Após o diagnóstico das falhas, o sistema de supervisão gerou as acções correctivas necessárias à acomodação da falha no sensor, usando um sensor virtual.



No caso de uma fuga de líquido num tanque, dependendo da severidade da fuga, o sistema de controlo responde à perturbação, continuando a assegurar o seguimento da referência, ou no caso mais grave, decide a reconfiguração do processo, activando os elementos redundantes (tanque  $T_2$  e bomba  $P_2$ ) para substituir o componente com falha (tanque  $T_1$ ). Para responder ao entupimento de uma tubagem (falha num componente do processo) o sistema com supervisão altera a referência de forma a assegurar os objectivos pretendidos, que neste caso se traduzem pela manutenção do nível de líquido no tanque  $T_2$  no valor nominal.

Deste modo, a aplicação do sistema de supervisão e controlo com tolerância a falhas ao processo “Três Tanques” vem perspectivar a validade da abordagem e metodologias propostas neste trabalho.

## 5.5 Conclusão

Este capítulo centrou-se na avaliação da abordagem e metodologias propostas para o projecto de sistemas de controlo tolerante a falhas, tendo em vista a sua aplicação a processos reais.

Nesse sentido, a implementação dos vários módulos que constituem o sistema de supervisão e controlo proposto foi distribuída pelos três casos de estudo de acordo com as características de cada processo que melhor se adequavam às funcionalidades de cada módulo do sistema. Assim, procedeu-se ao projecto e implementação de um sistema de controlo com tolerância passiva a falhas nos sensores e no actuador do processo laboratorial “Pêndulo Invertido” que é caracterizado pela sua instabilidade em malha aberta e não linearidade. Dada a inexistência de componentes redundantes procedeu-se à acomodação de um conjunto restrito de falhas.

De seguida, apresentou-se um conjunto de testes conduzidos numa instalação real de aproveitamento de energia solar – o Campo de Colectores Solares da Plataforma Solar de Almería. Embora a sua utilização tenha sido limitada, os resultados obtidos com a aplicação do módulo supervisor, baseado em lógica difusa, na identificação do modo de funcionamento e na selecção do controlador apropriado, permitem antever o potencial da abordagem proposta, essencialmente, a nível do sistema de supervisão, tendo em vista a sua utilização num contexto de maior dimensão e complexidade, nomeadamente a nível industrial.

Finalmente, os resultados obtidos com a aplicação dos módulos supervisor e de reconfiguração do sistema de supervisão e controlo ao processo laboratorial “Três Tanques” mostram a validade da abordagem proposta e perspectivam a aplicabilidade de todo o sistema em sistemas que apresentem componentes redundantes e assim possibilitem a consecução de tolerância activa a falhas através de mecanismos de acomodação e de reconfiguração.



## 6. Conclusão

Ao terminar esta Tese, apresentam-se, na secção 6.1, as principais conclusões sobre o trabalho realizado e perspectiva-se o seu futuro desenvolvimento na secção 6.2.

### 6.1 Conclusões

O projecto de sistemas de controlo para processos dinâmicos é cada vez mais exigente a nível de desempenho, de robustez e de tolerância a alterações do funcionamento normal do processo, provocadas quer pelo desgaste natural dos seus componentes quer pelo aparecimento de situações anómalas. A combinação destas exigências com a complexidade e sofisticação dos equipamentos envolvidos suscitam a consideração de sistemas automáticos que tornem possível a monitorização e a supervisão do processo. Para isso, é fundamental a definição estruturada de um sistema de supervisão e controlo com uma arquitectura funcional que permita dar resposta aos requisitos de projecto. O projecto de um sistema de controlo robusto e tolerante a falhas enquadra-se precisamente neste contexto e a proposta que resultou deste trabalho de investigação encontra-se descrita no Capítulo 2.

A Tese aqui formulada considera o desenvolvimento de metodologias de projecto de sistemas de controlo que para além da satisfação dos requisitos convencionais de controlo também consideram as exigências de robustez e de tolerância a falhas em sensores, em actuadores ou em componentes do processo, que possam alterar o modo normal de funcionamento do processo a controlar.

Dado que as metodologias propostas são baseadas num modelo do processo, assumiu-se a existência de um modelo não linear que representasse o comportamento dinâmico do processo de uma forma aceitável. Para as situações em que não é possível ou desejável obter um modelo analítico, propõe-se a modelização experimental baseada em redes neuronais com uma topologia recorrente de Elman.

O projecto de controladores considerou que cada modo de funcionamento do processo podia ser representado por uma aproximação linear, sendo as diferenças entre este modelo e o processo real, bem como os possíveis erros de modelização, representados por incertezas. Desta forma, o projecto do sistema de controlo considera que o processo dinâmico é representado por um ou mais modelos lineares com incertezas, definidos para cada modo de funcionamento.

Neste contexto, o projecto de controladores usando a formulação do controlo robusto surge como natural, sendo os vários objectivos e restrições do problema de controlo definidos em  $\mathcal{H}_\infty$ . Pretende-se desta forma obter para cada modo de funcionamento um controlador que apresente robustez em termos de estabilidade e de desempenho.

Pretendendo-se efectuar a monitorização do sistema, nomeadamente em termos do diagnóstico de falhas, a arquitectura do sistema considera a existência do módulo para a detecção, isolamento e identificação de falhas. A abordagem proposta no Capítulo 3 considera uma extensão da formulação usada no projecto do controlador robusto, integrando os requisitos de diagnóstico de falhas na formulação indicada anteriormente. Daqui resulta a síntese de um controlador robusto e tolerante às falhas consideradas e a geração de resíduos representativos da falha detectada. O sistema de controlo é, neste caso, de tolerância passiva a falhas de severidade reduzida, apresentando o controlador insensibilidade a essas falhas.

Procurando dotar o sistema de controlo de tolerância activa a falhas, a arquitectura proposta considera um nível de supervisão que inclui o diagnóstico de falhas a partir dos resíduos gerados pelo módulo de FDI e a supervisão do processo que identifica o seu modo de funcionamento, que gera alarmes e que estabelece as acções correctivas necessárias à acomodação e/ou à reconfiguração do processo.

O sistema proposto no Capítulo 4 apresenta tolerância activa a falhas, explorando redundâncias analíticas para acomodar aquelas que não impliquem a avaria de um componente e a sua retirada de operação. Caso se verifique a existência de componentes redundantes que possibilitem a operacionalidade do processo por vias alternativas, efectua-se a reconfiguração do processo usando, essencialmente sensores e actuadores virtuais. As acções correctivas geradas pelo supervisor no caso de ocorrência de falhas procuram garantir a satisfação dos objectivos definidos inicialmente, sendo admissível o seu relaxamento, desde que seja garantida a estabilidade e a segurança do sistema. Em casos limite, em que seja exigida a realização de acções de manutenção e/ou de reparação não automáticas, o sistema de supervisão e controlo deve garantir a paragem de operação do processo em segurança. Para o supervisor foi proposta uma abordagem baseada em lógica difusa.

No sentido de avaliar a aplicabilidade das metodologias propostas, foram desenvolvidos e implementados módulos do sistema de supervisão e controlo para o processo “Pêndulo Invertido”, para o Campo de Colectores Solares da Plataforma Solar de Almería e para o processo “Três Tanques” (Capítulo 5), em função das suas características.

Para o “Pêndulo Invertido”, dada a sua característica de instabilidade em malha aberta e a não existência de elementos redundantes, foi desenvolvido um sistema de controlo com o módulo de diagnóstico, de acordo com a abordagem proposta no Capítulo 3, podendo observar-se a identificação de falhas e a tolerância passiva a um conjunto restrito dessas falhas.

Relativamente ao controlo do Campo de Colectores Solares da Plataforma Solar de Almería, dada a limitação no acesso a este sistema e a ocorrência de alguns constrangimentos meteorológicos aquando das duas missões aí realizadas, não foi possível considerar todos os módulos do sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas proposto neste trabalho. Apesar disso, a implementação do mecanismo de supervisão, proposto no Capítulo 4, permitiu a análise do desempenho do supervisor baseado em lógica difusa na selecção do controlador apropriado ao modo de funcionamento identificado. Complementarmente, o trabalho de investigação realizado em colaboração com outros elementos do Grupo de Computação Adaptativa do CISUC veio mostrar a importância e a necessidade de considerar mecanismos de diagnóstico e de supervisão para que os sistemas de controlo apresentem tolerância activa a falhas.

Quanto à aplicação do sistema de supervisão e controlo ao processo “Três Tanques”, apresentaram-se alguns resultados que permitem analisar o desempenho de alguns dos módulos propostos no capítulo 4, nomeadamente, na presença de falhas em sensores, em componentes do processo e de perturbações.

O conjunto de resultados obtidos nos três casos de estudo vem mostrar a aplicabilidade do sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas proposto neste trabalho e evidenciar a pertinência do tema de investigação e a sua relevância para o desenvolvimento de sistemas de controlo que promovam o aumento da autonomia e do tempo de vida dos processos, satisfazendo os objectivos inicialmente estabelecidos.

## 6.2 Trabalho Futuro

Sendo o controlo com tolerância activa a falhas uma área com um potencial de crescimento significativo, existem diversas vias possíveis para o seu desenvolvimento. Na sequência deste trabalho de investigação, apontam-se em seguida algumas possibilidades de investigação e desenvolvimento:

i) Alargamento da tolerância activa do sistema de controlo proposto, a falhas internas no processo, explorando a combinação das metodologias apresentadas com as usadas no controlo predictivo. Esta possibilidade baseia-se nos promissores resultados obtidos na implementação do sistema de controlo do Campo de Colectores Solares (Gil *et al.*, 2003).

ii) Extensão das metodologias de diagnóstico e de controlo tolerante a falhas para a resolução de problemas onde o modelo do processo dinâmico não seja completamente conhecido e/ou presente um comportamento dinâmico significativamente não linear.

Neste caso, a combinação de metodologias de FDI convencionais com métodos baseados em redes neuronais ou em lógica difusa deverá ser considerada (Nyberg and Krysanter, 2003).

iii) Nos casos em que o processo a controlar é composto por vários componentes com várias possibilidades de interconexão, o projecto do sistema de supervisão será naturalmente mais complexo mas apresentará o desafio aliciante de encontrar os modos de reconfiguração do processo que dotem o sistema de controlo de tolerância activa a falhas severas ou mesmo a avarias em componentes do processo. Tal assegurará a continuidade do seu funcionamento sem a utilização do componente avariado e sem degradação significativa do desempenho global do sistema. Isto permitirá efectuar operações de reparação, de substituição do componente avariado ou de manutenção programada, sem ser necessário efectuar a paragem da operação do processo. Para isso, será importante o desenvolvimento de metodologias baseadas na informação obtida pela análise estrutural do processo (Izadi-Zamanabadi and Staroswiecki, 2000; Izadi-Zamanabadi, 2005), com especial relevância em aplicações de maior dimensão e complexidade.

iv) Frequentemente o projecto de sistemas de controlo tolerantes a falhas assume que o software necessário à sua implementação apresenta um grau de confiabilidade e robustez que não justifica considerar a existência de falhas ao nível do software. No entanto, o desenvolvimento de metodologias para o projecto de sistemas informáticos com tolerância a falhas tem grande relevância, principalmente quando são usados em processos críticos. Uma direcção possível de desenvolvimento consistirá no projecto integrado de sistemas de controlo com tolerância a falhas no processo e no software (Sanz and Arzén, 2003; Askerdal *et al.*, 2003).

v) A integração de redes de comunicação de dados no âmbito do controlo distribuído de processos dinâmicos tem vindo a assumir um papel de importância crescente. Neste contexto, os vários componentes (sensores, actuadores, controladores digitais, ou estações de supervisão) promovem a troca de informação através de redes de dados partilhadas. Por este facto, ao contrário do que sucede com conexões dedicadas, o controlo em malha fechada através de redes de comunicação de dados apresenta novos desafios que resultam, da perda de pacotes, das restrições ao nível da largura de banda ou de atrasos temporais induzidos (Patton *et al.*, 2005; El-Farra *et al.*, 2005). Deste modo, as sinergias entre a área de comunicações e a de supervisão e controlo deverão proporcionar a extensão das metodologias de diagnóstico de falhas e de supervisão e controlo tolerante a falhas a problemas de controlo distribuído com redes partilhadas de comunicação de dados (Ethernet ou Wireless) entre o processo e o sistema de controlo, constituindo uma via de desenvolvimento de grande relevância e actualidade.

No âmbito destas propostas de investigação e desenvolvimento, foram submetidos projectos de investigação à Fundação para a Ciência e Tecnologia – FCT, de modo a dar um contributo na área de controlo tolerante a falhas, explorando sinergias locais e interinstitucionais.

# Apêndice A – Terminologia de Controlo Tolerante a Falhas

A Terminologia usada nesta Dissertação tem como base a terminologia em língua inglesa definida, essencialmente, pelo Comité Técnico SAFEPROCESS do IFAC e por alguns autores de outras dissertações e de artigos nesta área de investigação.

A lista de termos que a seguir se apresenta constitui uma proposta para a versão portuguesa dos termos usualmente utilizados na literatura inglesa.

**Acção correctiva** (*remedial action*): Acção de correcção (reconfiguração ou alteração da operação de um sistema) que evita a propagação e a transformação de uma determinada falha num efeito final indesejado.

**Acomodação de falhas** (*fault accommodation*): Alteração dos parâmetros ou da estrutura do controlador para evitar as consequências de uma falha. A relação entrada-saída entre o controlador e o processo não é alterada. Os objectivos de controlo iniciais são satisfeitos ainda que o desempenho se possa degradar.

**Análise da propagação das falhas** (*fault propagation analysis*): Análise para determinar de que forma os efeitos das falhas se propagam através do sistema.

**Análise estrutural** (*structural analysis*): Análise das propriedades estruturais de um modelo, ou seja, das propriedades que são independentes dos valores efectivos dos parâmetros.

**Avaria** (*failure*): Interrupção permanente da capacidade (ou componente) de um sistema, ou de um componente do sistema, realizar uma determinada função em condições de operação específicas.

**Avaria com operacionalidade** (*fail-operational*): Situação em que um sistema pode funcionar sem alterações dos objectivos ou do desempenho, apesar da ocorrência de uma avaria num componente desse sistema. Representa a capacidade do sistema conter uma avaria em qualquer componente do sistema.

**Avaria com segurança** (*fail-safe*): Situação em que um sistema com avaria passa a funcionar num estado que se pode considerar de segurança, num contexto particular. Representa a capacidade do sistema conter uma avaria e de terminar a operação em segurança. Corresponde a um sistema em que uma falha pode ser detectada mas não isolada e em que a falha não pode ser acomodada, impedindo a continuidade da operação normal do sistema.

**Completeness** (*completeness*): Nível em que o sistema realiza completamente as tarefas especificadas para o seu funcionamento normal.

**Condição de reconfiguração** (*reconfiguration condition*): O pior efeito de uma falha que é tolerado pelo sistema através da acomodação da falha, antes de se executar uma acção de reparação que efectue a reconfiguração do sistema.

**Controlo reconfigurável** (*reconfigurable control*): Controlo baseado em métodos de reprojecto do controlador que envolvem o cálculo *online* dos seus parâmetros.

**Controlo restructurável** (*restructurable control*): Controlo baseado em métodos de reprojecto do controlador que envolvem o cálculo *online* dos parâmetros e a determinação de uma nova estrutura para o controlador.

**Confiabilidade** (*dependability*): É uma forma de disponibilidade caracterizada pela propriedade de um sistema estar disponível sempre que for solicitado. Corresponde ao grau de operacionalidade de um sistema e à capacidade de realizar a sua função específica em qualquer instante de tempo, aleatoriamente escolhido, durante um período de tempo de operação especificado, admitindo que se encontra disponível no início desse período de tempo.

**Criticalidade** (*criticality*): Medida que combina a severidade das consequências de um evento e a frequência desse evento.



**Decisão lógica** (*decision logic*): Funcionalidade que determina que a acção (ou acções) de reparação deve ser executada no caso de uma falha ter sido diagnosticada e que alarme (ou alarmes) deve ser gerado.

**Detecção de falhas** (*fault detection*): Determinação da presença de falhas num sistema e do tempo de detecção.

**Detector de falhas** (*fault detector*): Algoritmo que realiza a detecção e o isolamento de falhas.

**Diagnóstico de falhas** (*fault diagnosis*): Determinação do tipo, da dimensão, da localização e do instante temporal de detecção das falhas (inclui a detecção, o isolamento e a estimação das falhas).

**Discrepância** (*discrepancy*): Um comportamento anormal dos valores de uma variável física ou uma inconsistência entre os valores da variável e a relação entre eles.

**Disponibilidade** (*availability*): Probabilidade de um sistema ou equipamento estar a funcionar satisfatoriamente e de uma forma efectiva em qualquer instante de tempo.

**Efeito da avaria** (*failure effect*): Consequências de um modo de avaria na operação, no funcionamento ou no estado de um elemento de um sistema.

**Efeito da falha** (*fault effect*): Consequências de uma classe de falhas na operação, no funcionamento ou no estado de um elemento (componente) de um sistema.

**Efeito final** (*end-effect*): Consequência a um nível superior de um modo de avaria na operação, no funcionamento ou no estado de um sistema.

**Equação qualitativa** (*qualitative equation*): Equação em que a sua forma funcional e os valores dos seus coeficientes não estão completamente especificados.

**Erro** (*error*): desvio entre o valor medido ou calculado de uma variável (de saída) e o valor verdadeiro, especificado ou teoricamente correcto.

**Estimação de falhas** (*fault estimation*): Determinação da dimensão e do comportamento temporal da falha (posterior ao isolamento das falhas).

**Estrangulamento** (*dead-end*): Estado ou combinação de estados de uma máquina de estados, do qual só é possível sair com o reinício total da máquina.

**Falha** (*fault*): Desvio não permitido ao comportamento aceitável, usual ou normal (standard), de pelo menos uma propriedade característica ou parâmetro de um sistema.

**Falha abrupta** (*abrupt fault*): Falha cujo efeito se desenvolve de uma forma rápida (abrupta).

**Falha aditiva** (*additive fault*): Falha que influencia uma variável através da sua adição com a própria falha (por exemplo, offset em sensores).

**Falha incipiente** (*incipient fault*): Falha cujo efeito se desenvolve de uma forma lenta.

**Falha intermitente** (*intermittent fault*): Falha representada por uma combinação de impulsos de amplitudes diferentes.

**Falha multiplicativa** (*multiplicative fault*): Falha que influencia uma variável através da sua multiplicação com a própria falha (por exemplo, alteração de parâmetros do sistema).

**Falhas de saturação** (*saturation faults*): Falhas que diminuem a gama de operação nominal do actuador.

**Falhas de zona morta** (*dead zone faults*): Falhas que suprimem a saída do actuador numa gama de valores de entrada.

**Fiabilidade** (*reliability*): Probabilidade de um sistema realizar uma determinada função sob condições de operação normais e durante um dado período de tempo.

**Fusão sensorial** (*sensor fusion*): Integração de sinais correlacionados de sensores distintos (fontes da informação) numa única representação ou acção.

**Grafo estrutural** (*structure graph*): Grafo ordenado representando as equações estáticas e dinâmicas gerais (restrições) que descrevem o sistema. As restrições que traduzem mapeamentos isomorfos são representadas por arcos com setas em ambas as extremidades. Mapeamentos não-isomorfos são indicados por arcos unidireccionais. O grafo tem uma propriedade particular que é a de ser bipartido.

**Isolamento de falhas** (*fault isolation*): Determinação do tipo, da localização e do instante temporal de detecção das falhas (posterior à detecção de falhas).

**Limiar** (*threshold*): Valor limite do desvio de zero de um resíduo, que determina a detecção da falha quando é excedido.

**Mau funcionamento** (*malfunction*): Uma irregularidade intermitente no cumprimento de uma determinada funcionalidade de um sistema.

**Métodos baseados em modelos** (*model-based methods*): Métodos que utilizam modelos quantitativos ou qualitativos no projecto de sistemas de controlo tolerantes a falhas.

**Métodos baseados em projecções** (*projection-based methods*): Métodos que se baseiam na selecção de um controlador a partir de um conjunto de controladores previamente projectados. Usualmente, cada um desses controladores é projectado para uma situação de falha em particular, e a comutação é efectuada pelo mecanismo de reconfiguração (RM) sempre que o padrão de falha (*fault pattern*) correspondente é diagnosticado pelo sistema de detecção e diagnóstico.

**Métodos de re-projecto em linha** (*on-line re-design methods*): Métodos que podem envolver o cálculo *online* dos parâmetros do controlador e a determinação de uma nova estrutura para o controlador.

**Modelo de diagnóstico** (*diagnostic model*): Conjunto de relações estáticas ou dinâmicas que estabelecem ligações entre variáveis de entrada específicas – os sintomas – e variáveis de saída específicas – as falhas.

**Modelização das falhas** (*fault modelling*): Determinação de um modelo matemático que descreva o efeito de uma determinada falha.

**Modelo estrutural funcional** (*functional structure model*): Modelo em que o sistema é dividido em unidades que realizam determinadas funcionalidades.

**Modelo qualitativo** (*qualitative model*): Modelo que descreve o comportamento de um sistema através de relações estáticas e dinâmicas, usando variáveis e parâmetros do sistema em termos qualitativos (heurísticos), tais como causalidades ou regras se-então (*if-then*).

**Modelo quantitativo** (*quantitative model*): Modelo que descreve o comportamento de um sistema através de relações estáticas e dinâmicas, usando variáveis e parâmetros do sistema em termos quantitativos (analíticos), tais como equações algébricas, diferenciais ou de diferenças.

**Modo de Avaria** (*failure mode*): Uma forma particular de uma avaria ocorrer.

**Monitorização** (*monitoring*): Tarefa em tempo real que continuamente determina as condições de funcionamento de um sistema físico, através da recolha de informação que possibilite o reconhecimento e a indicação de anomalias no comportamento do sistema.

**Perturbação** (*disturbance*): Entrada desconhecida e não controlada que age sobre um sistema.

**Protecção** (*protection*): Conjunto de meios que permitem suprimir, caso seja possível, um comportamento potencialmente perigoso do sistema, ou que permitem evitar as consequências de um comportamento perigoso.

**Reconfiguração** (*reconfiguration*): alteração da relação entrada-saída entre o controlador e o processo devido a alterações na estrutura ou nos parâmetros do controlador. Os objectivos de controlo iniciais são satisfeitos, embora o desempenho possa ser degradado.

**Recuperabilidade** (*recoverability*): Possibilidade de acomodar as falhas ou de reconfigurar o sistema em caso de falha total de um componente.

**Redundância analítica** (*analytical redundancy*): Utilização de dois ou mais mecanismos, não necessariamente idênticos, para a determinação de uma variável, em que um deles considera uma forma analítica do modelo matemático do processo.

**Redundância de hardware** (*hardware redundancy*): Utilização de dois ou mais instrumentos independentes para a realização de uma determinada função.

**Reparador** (*effector*): Algoritmo que executa uma acção de reparação.

**Resíduo** (*residual*): Sinal indicador da existência de uma falha no sistema, baseado no desvio entre as medições e os cálculos obtidos a partir das equações do modelo do sistema.

**Restrição** (*constraint*): Limitação imposta pela natureza (leis físicas) ou pelo homem, que impõe que as variáveis apresentem determinados valores nos respectivos espaços. Normalmente traduz-se por uma relação funcional entre variáveis e parâmetros do sistema. As restrições podem ser especificadas em várias formas, tais como, equações algébricas, equações diferenciais lineares ou não lineares, ou relações com condições lógicas entre as variáveis.

**Segurança** (*safety*): Capacidade de um sistema não colocar em perigo ou não causar danos a pessoas, equipamentos ou no ambiente circundante.

**Severidade** (*severity*): Medida da gravidade dos efeitos de uma falha usando uma caracterização verbal. Esta medida considera o pior caso em termos dos danos provocados no equipamento ou no ambiente, ou em termos da degradação da operação do sistema.

**Sintoma** (*symptom*): alteração do comportamento normal de uma quantidade observada (monitorizada).

**Sistema de segurança** (*safety system*): Sistema electrónico que protege um subsistema de danos permanentes ou de danos para o ambiente, provocados por eventos potencialmente perigosos.

**Sistema tolerante a falhas** (*fault-tolerant system*): Sistema onde as falhas são acomodadas (recorrendo eventualmente à reconfiguração do sistema), com ou sem a degradação do seu desempenho, sem que as falhas se transformem em avarias.

**Sistema tolerante a falhas activo** (*active fault-tolerant system*): Sistema tolerante a falhas onde estas são explicitamente detectadas e acomodadas.

**Sistema tolerante a falhas passivo** (*passive fault-tolerant system*): Sistema tolerante a falhas onde as falhas não são explicitamente detectadas e acomodadas, mas em que o controlador é projectado para ser insensível a um conjunto restrito de falhas.

**Supervisão** (*supervision*): Monitorização de um sistema físico e realização de acções apropriadas à manutenção da sua operacionalidade no caso de ocorrência de falhas.

**Supervisor** (*supervisor*): Sistema que realiza a supervisão através da detecção e isolamento das falhas, da determinação das acções de reparação e da execução das respectivas acções correctivas.

**Tolerância a falhas** (*fault-tolerance*): Capacidade de um sistema controlado manter os objectivos de controlo, apesar da ocorrência de uma falha. A degradação do desempenho de controlo pode ser admitida. A tolerância a falhas pode ser obtida através da acomodação das falhas ou pela reconfiguração do sistema e/ou do controlador.



# Apêndice B - Definições e Princípios Básicos de Controlo Robusto

Neste Apêndice são apresentadas algumas definições e princípios básicos para a formulação do problema de controlo robusto para sistema lineares MIMO. Em particular, é apresentada a *decomposição em valores singulares* - SVD, que tem uma grande importância para o projecto de controladores robustos.

## B.1 Modelização

Um sistema linear e invariante no tempo pode ser descrito por um sistema de equações diferenciais e algébricas no domínio temporal:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}\tag{B.1}$$

em que  $x \in \mathcal{R}^{n_x}$ ,  $y \in \mathcal{R}^{n_y}$  e  $u \in \mathcal{R}^{n_u}$  correspondem aos vectores de estados, de saída e de entrada, respectivamente, e  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  são matrizes constantes com dimensões apropriadas. Usando a transformada de Laplace e considerando condições iniciais nulas, obtém-se a *matriz de transferência do sistema* dada por:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D.\tag{B.2}$$

Os elementos  $G_{ij}(s)$  de  $G(s)$  são funções de transferência que expressam as relações entre a entrada  $u_j(s)$  e a saída  $y_i(s)$ . Neste apêndice é assumido que a matriz  $G(s)$  tem uma *característica normal* completa, ou seja  $\text{rank}[G(s)] = \min\{n_y, n_u\}$  para todo o  $s \in \mathcal{C}$ , excepto para um número finito de elementos de  $\mathcal{C}$ .

Em geral, as funções de transferência  $G_{ij}(s)$  são consideradas próprias e causais tendo em conta que devem ser fisicamente realizáveis e podem incluir tempos de atraso puros.

**Definição B-1.** Um sistema  $G(s)$  é *próprio* se todos os seus elementos  $G_{ij}(s)$  são *próprios* e é *estritamente próprio* se todos os seus elementos forem *estritamente próprios*.

**Definição B-2.** Um sistema  $G(s)$  é *causal* se todos os seus elementos  $G_{ij}(s)$  são *causais*.

## B.2 Pólos

**Definição B-3.** Os valores próprios  $\lambda_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_p$ , da matriz  $A$  correspondem aos pólos do sistema (B.1). O polinómio característico  $\lambda(s)$  é definido como:

$$\lambda(s) = \prod_{i=1}^{n_p} (s - \lambda_i) \quad (\text{B.3})$$

em que  $n_p$  é o número de pólos de  $G(s)$ . Os pólos são as raízes da equação característica  $\lambda(s) = 0$  e determinam a estabilidade do sistema.

**Teorema B-1.** O sistema definido em (B.1) é estável sse todos os pólos  $\{\lambda_i\}$  estiverem no semi-plano esquerdo (aberto).

Tendo em conta o seguinte teorema, é possível determinar os pólos do sistema directamente a partir da matriz de transferência  $G(s)$  sem que se tenha obtido a matriz  $A$  do sistema.

**Teorema B-2.** O polinómio característico  $\lambda(s)$  é o mínimo denominador comum de todos os menores não nulos de todas as ordens de  $G(s)$ .

## B.3 Zeros

Para um sistema SISO, se  $\zeta$  é um zero de  $G(s)$  então  $G(\zeta) = 0$ . Por outro lado,  $\zeta$  é um zero de  $G(s)$  sse  $\zeta$  é um pólo de  $G^{-1}(s)$ . A seguinte definição permite fazer uma extensão destes conceitos para o caso de sistemas MIMO.



**Definição B-4.**  $\zeta$  é um zero de  $G(s)$  se a característica de  $G(\zeta)$  é menor que característica normal de  $G(s)$ .

Dado que se assume que  $G(s)$  tem uma característica normal completa, a matriz de transferência fica com uma característica deficiente para  $s = \zeta$ . O polinómio  $\zeta(s)$  associado aos zeros é definido como:

$$\zeta(s) = \prod_{i=1}^{n_z} (s - \zeta_i) \quad (\text{B.4})$$

em que  $n_z$  é o número de zeros finitos de  $G(s)$ .

O teorema seguinte apresenta um método para o cálculo dos zeros.

**Teorema B-3.** O polinómio associado aos zeros  $\zeta(s)$  é o máximo divisor comum dos numeradores de todos os menores de ordem  $r$  de  $G(s)$ , em que  $r$  é a característica de  $G(s)$  e tendo em conta que todos os menores foram ajustados de forma a que o seu denominador seja o polinómio característico  $\lambda(s)$ .

De referir que um sistema MIMO poderá ter zeros e pólos iguais, o que indica que não é possível, duma forma geral, determinar todos os zeros dum sistema com o mesmo número de entradas e saídas a partir da condição  $G(s)=0$  porque, quando se calcula o determinante, os pólos e os zeros iguais cancelam-se.

**Definição B-5.** Um sistema  $G(s)$  é de fase não mínima (FNM) se a sua matriz de transferência contiver zeros no SPD ou se existir um termo com tempo de atraso comum a todos os  $G_{ij}(s)$  que pode ser posto em evidência em relação a todos os elementos da matriz.

Dado que a localização dos zeros dum sistema MIMO não está directamente relacionada com a localização dos zeros das funções de transferência SISO que constituem o sistema MIMO, é possível que o sistema MIMO seja de FNM mesmo que todas as funções de transferência SISO sejam de FM e vice-versa.

## B.4 Normas de vectores e de matrizes

Se  $E$  for um *espaço linear* num conjunto  $\mathcal{K}$  (por exemplo,  $\mathcal{K}$  poderá ser o conjunto dos números reais  $\mathcal{R}$  ou o conjunto dos números complexos  $\mathcal{C}$ ), a função de valor real  $\| \cdot \|$  é a norma em  $E$  sse:

$$\begin{aligned} \|x\| &> 0 \quad \forall x \in E, x \neq 0 \\ \|x\| &= 0 \quad x = 0 \\ \|\alpha x\| &= |\alpha| \|x\| \quad \forall \alpha \in \mathcal{K}, \forall x \in E \\ \|x + y\| &\leq \|x\| + \|y\| \quad \forall x, y \in E \end{aligned} \tag{B.5}$$

Fazendo  $E = \mathcal{C}^{n \times n}$ , o conjunto de todas as matrizes  $n \times n$  com elementos pertencentes ao conjunto  $\mathcal{C}$ , podem definir-se as seguintes normas em  $\mathcal{C}^{n \times n}$ :

$$\begin{aligned} \|A\|_1 &= \max_j \sum_i |a_{ij}| \\ \|A\|_\infty &= \max_i \sum_j |a_{ij}| \\ \|A\|_F &= \left[ \sum_i \sum_j |a_{ij}|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{norma Euclidiana ou de Frobenius} \\ \|A\|_2 &= \max_i \lambda_i^{\frac{1}{2}}(A^* A) \quad \text{norma espectral} \end{aligned} \tag{B.6}$$

em que os valores próprios  $\lambda_i(A^* A)$  são (necessariamente) reais e não negativos.

Dado que  $A^* A$  é positiva semidefinida, com  $A \in \mathcal{C}^{n \times n}$ , podem estabelecer-se as seguintes desigualdades:

$$\|A\|_2 \leq \|A\|_F \leq \sqrt{n} \|A\|_2 \tag{B.7}$$

$$e \quad \max_i \lambda_i(A^* A) \leq \|A\|_F^2 = \text{traço}[A^* A] \leq n \max_i \lambda_i(A^* A) \tag{B.8}$$

Até aqui consideraram-se as matrizes como elementos dum espaço linear. Em seguida vai considerar-se que as matrizes correspondem à representação duma transformação linear. Assim, é conveniente adoptar uma notação diferente, usando  $|\cdot|$  para as normas em  $\mathcal{R}^n$  ou em  $\mathcal{C}^n$  e  $\|\cdot\|$  para normas em espaços de funções ou para normas induzidas por operadores lineares.

Sendo  $|\cdot|$  a norma em  $E$  e  $A$  uma transformação linear de  $E$  em  $E$ , define-se a seguinte função:

$$\|A\| \triangleq \sup_{x \neq 0} \frac{|Ax|}{|x|} \quad \text{ou} \quad \|A\| \triangleq \sup_{|x|=1} |Ax| \quad (\text{B.9})$$

À quantidade  $\|A\|$  dá-se o nome de norma induzida pela transformação linear  $A$  ou operador norma induzida pela norma  $|\cdot|$ .

Tendo em conta a definição dada pela equação (B.9), qualquer norma induzida satisfaz as seguintes condições:

$$\begin{aligned} |Ax| &\leq \|A\| \cdot |x| \\ \|\alpha A\| &= |\alpha| \|A\| \\ \|A+B\| &\leq \|A\| + \|B\| \\ \|AB\| &\leq \|A\| \cdot \|B\| \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

Toda a norma de matriz  $N(\cdot)$  que satisfaça:

$$N(AB) \leq N(A)N(B) \quad (\text{B.11})$$

é chamada *compatível*. A norma induzida é um exemplo duma norma compatível.

Se  $\lambda(A)$  for um valor próprio de  $A$  e  $x$  o vector próprio correspondente, então as normas de matrizes e vectores compatíveis satisfazem:

$$|Ax| = |\lambda(A)| \cdot |x| \leq \|A\| \cdot |x| \quad (\text{B.12})$$

$$\text{ou} \quad |\lambda(A)| \leq \|A\| \quad (\text{B.13})$$

Definindo  $\rho(A)$  como o *raio espectral de  $A$* , ou seja:

$$\rho(A) = \max_i |\lambda_i(A)| \quad (\text{B.14})$$

e tendo em conta que a equação (B.13) se verifica para qualquer valor próprio de  $A$ , obtém-se:

$$\rho(A) \leq \|A\| \quad (\text{B.15})$$

Assim, o raio espectral estabelece um limite inferior para qualquer norma de matriz compatível.

## B.5 Decomposição em Valores Singulares

Os *valores singulares* duma matriz complexa  $A$  de dimensões  $n \times m$ , representados por  $\sigma_i(A)$ , são as  $k$  maiores raízes quadradas não negativas dos valores próprios de  $A^*A$ , em que  $k = \min\{n, m\}$ , ou seja:

$$\sigma_i(A) = \sqrt{\lambda_i(A^*A)} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (\text{B.16})$$

em que se assume que os valores  $\sigma_i$  estão ordenados de forma que  $\sigma_i \geq \sigma_{i+1}$ .

O *valor singular máximo* ( $\bar{\sigma}$ ) pode ser definido por:

$$\bar{\sigma}(A) = \max_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|_2}{\|x\|_2} = \|A\|_2 \quad (\text{B.17})$$

e o *valor singular mínimo* por:

$$\begin{aligned} \underline{\sigma}(A) &= \|A^{-1}\|_2^{-1} \quad \text{se } A^{-1} \text{ existir} \\ &= \min_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|_2}{\|x\|_2} \end{aligned} \quad (\text{B.18})$$

O menor valor singular  $\underline{\sigma}(A)$  mede a proximidade a que a matriz  $A$  está de ser singular ou com a característica deficiente.

**Definição B-6.** Uma matriz complexa  $A$  é Hermitiana se  $A^* = A$ .

**Definição B-7.** Uma matriz complexa  $A$  é unitária se  $A^* = A^{-1}$ .

Uma forma expedita de representar uma matriz evidenciando a sua estrutura interna é conhecida pela *Decomposição em Valores Singulares* (SVD - *Singular Value Decomposition*).

Para uma matriz  $A$  de dimensões  $n \times m$ , a SVD de  $A$  é dada por:

$$A = U \Sigma V^* = \sum_{i=1}^k \sigma_i(A) u_i v_i^* \quad (\text{B.19})$$

em que  $U$  e  $V$  são matrizes unitárias com os vectores colunas representados por:

$$U = [u_1, u_2, \dots, u_n] \quad (\text{B.20})$$

$$V = [v_1, v_2, \dots, v_m] \quad (\text{B.21})$$

e  $\Sigma$  contém uma matriz diagonal  $\Sigma_1$  definida e não negativa com os valores singulares colocados por ordem decrescente, configurada da seguinte forma:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad n \geq m \quad (\text{B.22})$$

ou

$$\Sigma = [\Sigma_1 \ 0]; \quad n \leq m \quad (\text{B.23})$$

com

$$\Sigma_1 = \text{diag} \{ \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k \}; \quad k = \min\{m, n\} \quad (\text{B.24})$$

em que

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k = \underline{\sigma} \quad (\text{B.25})$$

Dado que as colunas das matrizes  $U$  e  $V$  são vectores próprios unitários de  $A^*A$  e de  $AA^*$  respectivamente, dá-se lhes o nome de *vectores singulares à direita e à esquerda* para a matriz  $A$ .

Sendo  $\underline{\lambda}(A)$  o valor próprio de menor amplitude de  $A$  e  $\underline{x}$  o vector próprio que lhe está associado, obtém-se de (B.18) para o valor singular mínimo:

$$\underline{\sigma}(A) \leq \min_{x \neq 0} \frac{|Ax|_2}{|x|_2} \leq \frac{|A\underline{x}|_2}{|\underline{x}|_2} = |\underline{\lambda}(A)| \quad (\text{B.26})$$

Então, combinando as equações (B.15) e (B.26) conclui-se que  $\underline{\sigma}$  e  $\bar{\sigma}$  limitam a amplitude dos valores próprios:

$$\underline{\sigma}(A) \leq |\lambda_i(A)| \leq \bar{\sigma}(A) \quad (\text{B.27})$$

Se a matriz  $A$  for Hermitiana, então os valores singulares coincidem com os valores próprios.

Se a matriz  $A$  for quadrada e não singular verifica-se que:

$$A^{-1} = V \Sigma^{-1} U^* \quad (\text{B.28})$$

é a SVD de  $A^{-1}$  mas com os valores singulares ordenados por ordem inversa. Então, fazendo  $l=n-j+1$ , verifica-se que:

$$\begin{aligned} \sigma_j(A^{-1}) &= 1/\sigma_l(A) \\ u_j(A^{-1}) &= v_l(A) \\ v_j(A^{-1}) &= u_l(A) \end{aligned} \quad (\text{B.29})$$

e em particular:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}(A^{-1}) &= 1/\underline{\sigma}(A) \\ \bar{u}(A^{-1}) &= \underline{v}(A) \\ \underline{u}(A^{-1}) &= \bar{v}(A)\end{aligned}\tag{B.30}$$

Se  $G(j\omega)$  é uma matriz de transferência pode efectuar-se o traçado gráfico dos valores singulares  $\sigma_i(G(j\omega))$  ( $i=1, \dots, k$ ) como uma função da frequência. Estas curvas traduzem a generalização dos diagramas de Bode (em amplitude) dos sistemas SISO para os sistemas MIMO. No caso MIMO, a amplificação do vector sinusoidal de entrada  $ue^{j\omega t}$  depende da *direcção* do vector complexo  $u$ : a amplificação está compreendida entre  $\underline{\sigma}(G(j\omega))$  e  $\bar{\sigma}(G(j\omega))$ .

## B.6 Normas no espaço de funções

Neste ponto pretende-se mostrar a extensão do conceito de norma aos espaços lineares cujos elementos são funções. Considere-se então o vector de funções  $y(s)$  de dimensão  $n$ . Define-se o conjunto  $L_2^n$  como o conjunto de todos os vectores de funções com dimensão  $n$  que são quadraticamente integráveis no eixo imaginário, ou seja para as quais a seguinte quantidade é finita:

$$\|y(j\omega)\|_2 = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} y(j\omega)^* y(j\omega) d\omega \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.31})$$

De notar que a equação (B.31) define a norma-2 da função  $y(j\omega)$  como um *produto interno*. Para o caso especial de  $y(j\omega)$  não ter pólos no SPD (fechado), o *teorema de Parseval* fornece uma expressão equivalente para o domínio temporal da norma-2 de  $y(t)$  ( $\|y\|_2$ ), dada por:

$$\|y(t)\|_2 = \left[ \int_0^{\infty} y(t)^T y(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.32})$$

Considerando agora que a função  $G(s)$  é uma *matriz de funções* de dimensão  $m \times n$ , a equação (B.31) será definida como:

$$\|G(s)\|_2 = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{traço} [G(j\omega)^* G(j\omega)] d\omega \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.33})$$

em que  $G(s)$  pertence ao conjunto  $L_2^{m \times n}$  de todas as matrizes de funções com dimensão  $m \times n$  para as quais a equação (B.33) é finita.

Considerando agora o sistema linear  $y(s) = G(s)u(s)$ , pode colocar-se a seguinte questão: dado o limite em  $\|u\|_2$  qual será o menor limite superior de  $\|y\|_2$ ? Por outras palavras, pretende-se encontrar o operador norma  $\|\cdot\|_{i2}$  induzido pela  $\|\cdot\|_2$ .

**Teorema B-4.** Considerando  $u \in L_2^n$  e  $G \in L_2^{m \times n}$ , então  $y \in L_2^m$  e a norma do operador  $G$  induzida pela  $\|\cdot\|_2$  é dada por:

$$\|G\|_{i2} = \sup_{\omega} \bar{\sigma}(G(j\omega)) = \|G\|_{\infty} \quad (\text{B.34})$$

em que  $\|G(j\omega)\|_{\infty}$  é a norma- $\infty$  da função  $G$  no domínio da frequência.

Comparando a norma-2 dum operador com o operador norma induzido pela norma-2 (norma- $\infty$ ), verifica-se que para o controlo óptimo -  $H_2$  o desempenho é otimizado para um *sinal de entrada específico* através da minimização da *norma-2 ponderada do operador sensibilidade*. Para o controlo óptimo -  $H_\infty$  o desempenho é otimizado para um *conjunto de sinais com a sua norma-2 limitada*. Isto implica a minimização da *norma do operador sensibilidade induzida pela norma-2*, que é igual à norma- $\infty$  da função sensibilidade.

## B.7 O valor singular estruturado

Considere-se  $X_v$  o conjunto de todas as perturbações complexas com uma estrutura definida em diagonal por blocos e com uma norma espectral inferior a  $v$ :

$$X_v = \{ \Delta = \text{diag} \{ \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m \} : \bar{\sigma}(\Delta_i) \leq v \} \quad (\text{B.35})$$

e  $M$  como a função de transferência nominal do sistema em malha fechada visto pelas incertezas. Concretizando melhor,  $M$  corresponde à função de transferência nominal entre a saída das perturbações  $\Delta_i$  e as respectivas entradas.

A estabilidade robusta é garantida sse

$$\det(I - M\Delta) \neq 0 \quad \forall \Delta \in X_v \quad (\text{B.36})$$

$$\Leftrightarrow \rho(M\Delta) < 1 \quad \forall \Delta \in X_v \quad (\text{B.37})$$

ou

$$\Leftrightarrow v < \bar{\sigma}^{-1}(M) \quad (\text{B.38})$$

De notar que a condição (B.38) só é suficiente em relação a (B.36).

**Definição B-8.** A função  $\mu(M)$  (*Valor Singular Estruturado*) é definida tal que  $\mu^{-1}(M)$  seja igual ao menor  $\bar{\sigma}(\Delta)$  necessário para que  $(I-M\Delta)$  seja singular, ou seja:

$$\mu^{-1}(M) = \min_v \{ v : \det(I - M\Delta) = 0 \text{ para algum } \Delta \in X_v \} \quad (\text{B.39})$$

Se não existir nenhum  $\Delta$  tal que  $\det(I-M\Delta) = 0$ , então  $\mu(M) = 0$ .

Embora a definição (B-8) não seja muito propícia para o cálculo de  $\mu$ , existe um conjunto de propriedades de  $\mu$  que mostram a sua grande aplicabilidade.



### B.7.1 Propriedades de $\mu$

1.  $\mu(\alpha M) = |\alpha|\mu(M)$  , em que  $\alpha$  é um escalar.

2. Tendo em conta o que foi referido anteriormente, obtém-se:

$$\rho(M) \leq \mu(M) \leq \bar{\sigma}(M) \quad (\text{B.40})$$

3. Considere-se  $\mathbf{U}$  o conjunto de todas as matrizes unitárias com a mesma estrutura diagonal por blocos de  $\Delta$ . Se  $U \in \mathbf{U}$  e  $\Delta \in X$ , então  $U\Delta \in X$  e  $\mu(MU) = \mu(M)$ .

Assim, tendo em conta (B.40) obtém-se:

$$\rho(MU) \leq \mu(M) \quad \forall U \in \mathbf{U} \quad (\text{B.41})$$

Efectivamente, pode verificar-se que:

$$\max_{U \in \mathbf{U}} \rho(MU) = \mu(M) \quad (\text{B.42})$$

4. Considere-se  $\mathcal{D}$  o conjunto das matrizes diagonais reais e positivas  $D = \text{diag}\{d_i I_i\}$  em que a dimensão de cada bloco (ou seja a dimensão de  $I_i$ ) é igual à dimensão dos blocos  $\Delta_i$ . Se  $D \in \mathcal{D}$  e  $\Delta \in X$ , então  $D\Delta D^{-1} \in X$  e  $\mu(DMD^{-1}) = \mu(M)$ . Assim, a partir de (B.40) obtém-se:

$$\mu(M) \leq \bar{\sigma}(DMD^{-1}) \quad \forall D \in \mathcal{D} \quad (\text{B.43})$$

o que sugere a definição dum limite superior para  $\mu(M)$  dado por:

$$\mu(M) = \inf_{D \in \mathcal{D}} \bar{\sigma}(DMD^{-1}) \quad (\text{B.44})$$

A minimização de  $\|DMD^{-1}\|_F$  é uma boa aproximação para a matriz  $D$  óptima que minimiza  $\bar{\sigma}(DMD^{-1})$ .

### B.7.2 O número de condição e a matriz de ganhos relativos

O *número de condição dum processo*, representado por  $\gamma$ , é definido como a razão entre o maior e o menor ganho do processo, ou seja:

$$\gamma(G) = \frac{\bar{\sigma}(G)}{\underline{\sigma}(G)} \quad (\text{B.45})$$

A *matriz de ganhos relativos (RGA - Relative Gain Array)* dum matriz  $M$  é definida como:

$$\Lambda(M) = M \times (M^{-1})^T \quad (\text{B.46})$$

onde o símbolo  $\times$  representa o produto (de Schur) elemento a elemento.

Se  $M$  for uma matriz de transferência então  $\Lambda(M)$  é uma função da frequência e tem as seguintes propriedades:

1. Para todas as linhas ou colunas verifica-se que a soma dos seus elementos é igual a 1:

$$\sum_i M_{ij} = \sum_j M_{ij} = 1 \quad (\text{B.47})$$

2. A matriz de ganhos relativos é independente da transformação:

$$\Lambda(D_1 M D_2) = \Lambda(M) \quad (\text{B.48})$$

em que  $D_1$  e  $D_2$  são matrizes arbitrárias diagonais e não singulares.

3. Uma permuta de linhas ou colunas na matriz  $M$  origina a mesma permuta de linhas ou colunas na matriz de ganhos relativos.

# Bibliografia

Na listagem da bibliografia citada nesta dissertação seguiu-se essencialmente o estilo proposto pelo IFAC e consideraram-se as abreviaturas de Proceedings (Proc.) e de Technical Report (Tech. Rep.).

- Ahmed-Zaid, F., P. Ioannou, K. Gousman and R. Rooney (1991). Accommodation of failures in the F-16 aircraft using adaptive control. *IEEE Control Systems Magazine*, 11(1), 73–78.
- Akhenak, A., M. Chadli, D. Maquin, and J. Ragot (2003). State estimation via multiple observer. The three tank system. *Proc. of the 5<sup>th</sup> IFAC Symp. on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington DC, USA, 1227–1232.
- Amira (1996a). *Laboratory Experiment Inverted Pendulum PS600*, Amira GmbH, Duisburg, Germany.
- Amira (1996b). *Three Tank System DTS200: Laboratory Set-Up*, Amira GmbH, Duisburg, Germany.
- Anderson, B. D. O. and Y. Liu (1989). Controller Reduction: Concepts and Approaches, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34, 802-812.
- Askerdal, Ö, M. Gäfvert, M. Hiller and N. Suri (2003). Analysing the Impact of Data Errors in Safety-Critical Control Systems, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, E86-D(12), 2623-2633.
- Aström, K. and K. Furuta (2000). Swinging up a Pendulum by Energy Control. *Automatica*, 36(2), 287-295.

- Aström, K., P. Albertos, M. Blanke, A. Isidori, W. Schauffelberger and R. Sanz (Eds.) (2001). *Control of Complex Systems*. Springer Verlag London.
- Athans, M., D. Castanon, K. Dunn, C. Greene, W. Lee, N. Sandell and A. Willsky (1977). The stochastic control of the F-8C aircraft using multiple model adaptive control (MMAC) method - part 1: Equilibrium flight. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22(5), 768–780.
- Balas, G. J., J. C. Doyle, K. Glover, A. Packard and R. Smith (1994).  $\mu$ -Analysis and Synthesis Toolbox ( $\mu$ -Tools). *Automatica*, 30(4), 733-735.
- Balas, G. J., J. C. Doyle, K. Glover, A. Packard and R. Smith (1995).  *$\mu$ -analysis and Synthesis Toolbox: User's Guide*. MUSYN Inc. and The Mathworks, Inc.
- Ballé, P., M. Fischer, D. Füssel, O. Nelles and R. Isermann (1998). Integrated control, diagnosis and reconfiguration of a heat exchanger. *IEEE Control Systems Magazine*, 18(3), 52–63.
- Basseville, M. (1998). On-board component fault detection and isolation using the statistical local approach, *Automatica*, 34(11), 1391-1416.
- Battaini, M. and S. Dyke (1998). Fault tolerant structural control systems for civil engineering applications. *Journal of Structural Control*, 5, 5-29.
- BBC World (2001). *Chernobyl head sacked over misused funds*. <http://news.bbc.co.uk/go/em/fr/-/1/hi/world/europe/1707392.stm>.
- Berenguel, M., E. Camacho and F. Rubio (1993). Simulation software package of the acurex field. *Internal report*, ESI de Sevilha, Espanha.
- Bezdek, J. (1981). Pattern recognition with fuzzy objective functions algorithms. *Plenum*, New York, USA.
- Belkharraz, A. and K. Sobel (2000). Fault tolerant flight control of control surface failures. *Proc. of the American Control Conference (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA.
- Bennani, S., R. van der Sluis, G. Schram and J. Mulder (1999). Control law reconfiguration using robust linear parameter varying control. *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Portland, 977–987.

- Blanke, M., S. Bøgh, R. Jørgenson and R. Patton (1995). Fault detection for a diesel engine actuator – a benchmark for FDI. *Control Engineering Practice*, 3(12), 1731–1740.
- Blanke, M. (1996). Consistent design of dependable control systems. *Control Engineering Practice*, 4(9), 1305-1312.
- Blanke, M. R. Izadi-Zamanabadi, S. Bogh and C. Lunau (1997). Fault-tolerant control systems – a holistic view. *Control Engineering Practice*, 5(5), 693-702.
- Blanke, M., R. Izadi-Zamanabadi and T. Lootsma (1998). Fault monitoring and reconfigurable control for a ship propulsion plant. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 12, 671–688.
- Blanke, M., C. Frei, F. Kraus, R. Patton and M. Staroswiecki (2000). What is fault tolerant control? *Proc. of the 4<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2000)*. Budapest, Hungary, 40-51.
- Blanke, M., M. Staroswiecki and N.E. Wu (2001). Concepts and methods in fault-tolerant control. *Tutorial in American Control Conference*. Arlington, USA.
- Blanke, M. (2001). Enhanced Maritime Safety through Diagnosis and Fault Tolerant Control, *Proc. IFAC Conference CAMS'2001*, Glasgow, Scotland.
- Blanke, M., M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki (2003). *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer Verlag.
- Bodson, M. and J. Groszkiewicz (1997). Multivariable adaptive control algorithms for reconfigurable flight control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 5(2), 217-229.
- Bogh, S., R. Izadi-Zamanabadi and M. Blanke (1995). Onboard supervisor for the orsted satellite attitude control system. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Workshop on Artificial Intelligence and Knowledge Based Systems for Space*. Noordwijk, The Netherlands, 137–152.
- Bogh, S. (1997). *Fault-tolerant control Systems: A development Method and Real-Life Case Study*. PhD Thesis, Aalborg University, Denmark.

- Bogh, S. and M. Blanke (1997). *Fault-tolerant control a case study of the Orsted Satellite*. IEE Colloquium on Fault Diagnosis in Process Systems (Digest No: 1997/174), 1101-1113.
- Bonivento, C., A. Paoli and L. Marconi (2001a). Direct fault-tolerant control approach for a winding machine. *Proc. of the 9<sup>th</sup> Mediterranean IEEE Conference on Control and Automation (MED'01)*. Dubrovnik, Croatia.
- Bonivento, C., A. Paoli and L. Marconi (2001b). Fault-tolerant control for a ship propulsion systems. *Proc. of the 6<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'01)*. Porto, Portugal, 1964–1969.
- Bonivento, C., A. Paoli and L. Marconi (2003a). Fault-tolerant control of the ship propulsion system benchmark. *Control Engineering Practice*, 11(5), 483–492.
- Bonivento, C., L. Marconi, A. Paoli and C. Rossi (2003b). A framework for reliability analysis of complex diagnostic systems. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 567–572.
- Bonnet, A. (1999). Understanding motor shaft failures. *IEEE Industry Application Magazine*, (September-October), 25–41.
- Börner, M. and R. Isermann (2004). Supervision, Fault Detection and Sensor Fault Tolerance of Passenger Cars, *Proc. of the 5<sup>th</sup> IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS)*, Washington D.C., USA.
- Boskovic, J. and R. Mehra (1998). A multiple model-based reconfigurable flight control system design. *Proc. of the 37<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'98)*. Tampa, Florida, USA, 4503–4508.
- Boskovic, J., S. Li and R. Mehra (1999). Intelligent control of spacecraft in the presence of actuator failures. *Proc. of the 38<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*. Phoenix, Arizona, USA.
- Boskovic, J., S. Li and R. Mehra (2000a). A decentralized fault-tolerant scheme for flight control applications. *Proc. of the American Control Conference (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA.

- Boskovic, J., S. Li and R. Mehra (2000b). Fault-tolerant control of spacecraft in the presence of sensor bias. *Proc. of the American Control Conference (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA.
- Boskovic, J. and R. Mehra (2003). Failure detection, identification and reconfiguration system for a redundant actuator assembly. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 429-434.
- Boumaman, O. and G. Dauphin-Tanguy (1996). Bond graph model of a steam generator process and its environment. *Proc. of the 10<sup>th</sup> European Simulation Multiconference*. Budapest, Hungary, 238-242.
- Branco P. J. C., J. A. Dente and R. V. Mendes (2003). Using Immunology Principles for Fault detection. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 50(2), 362-373.
- Buffington, J., P. Chandler and M. Pachter (1999). On-line system identification for aircraft with distributed control effectors. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 9, 1033–1049.
- Bugeja, Marvin (2003). Non-linear Swing-Up and Stabilizing Control of an Inverted Pendulum System. *Proc. of the EUROCON 2003*, Ljubljana, Slovenia, Vol. 2, 437–441.
- Burken, J., P. Lu and Z. Wu (1999). Reconfigurable flight control designs with application to the X-33 vehicle. *Proc. of the AIAA Guidance Navigation and Control Conference*. Portland, Oregon, USA, AIAA-99-4134.
- Callier, F. M. and C. A. Desoer (1991). *Linear System Theory*. Springer-Verlag, New York.
- Camacho, E., F. Rubio and J. Gutierrez (1988). Modelling and simulation of a Solar Power Plant with a distributed collector system. *IFAC Symposium Power Systems, Modelling and Control Applications*, Brussels, Belgium.
- Camacho, E., F. Rubio and F. Hughes (1992). Self-Tuning control of a Solar Power Plant with a distributed collector field, *IEEE Control Systems Magazine*, 12(2), 72-78.

- Chang, T. (2000). Reliable control for systems with block-diagonal feedback structure. *Proc. of the American Control Conference (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA, 829–833.
- Chang, B., G. Baipai and H. Kwatny (2001). A regulator design to address actuator failures. *Proc. of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'01)*. Orlando, Florida, USA.
- Charbonnaud, P., F. J. Carrillo and S. Médar (2003). Robust Control Reconfiguration of a Thermal Process With Multiple Operating Modes, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 11(4), 529-538.
- Chen, J., R. Patton and Z. Chen (1998a). Linear Matrix Inequality formulation of fault-tolerant control systems design. *Proc. of the IFAC Workshop On-line Fault Detection & Supervision in the Chemical Process Industries*. Lyon, France.
- Chen, J., R. Patton and Z. Chen (1998b). An LMI approach to fault-tolerant control of uncertain systems. *Proc. of the 1998 IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference*. Gaithersburg, MD, USA, 14-17.
- Chen, J. and R. Patton (1999). *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers.
- Chen, J. and R. Patton (2001). Fault-tolerant control systems design using the linear matrix inequality approach. *Proc. of the 6<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'01)*. Porto, Portugal.
- Chen, L. and K. Narendra (2001). Nonlinear adaptive control using neural networks and multiple models. *Automatica*, 37(8), 1245–1255.
- Chen, Y. M. and M. L. Lee (2002). Neural networks-based scheme for system failure detection and diagnosis. *Mathematics and Computers in Simulation*, 59, 101-109.
- Cho, Y. and Z. Bien (1989). Reliable control via an additive redundant controller. *International Journal of Control*, 50(1), 385-398.
- Choi, B. W., D. W. Gu and I. Postlethwaite (1994). Low-order  $H_\infty$  suboptimal controllers. *IEE Proc. - Control Theory Appl.*, 141(4), 243-248.



- Chu, S. R. and R. Shoureshi (1992). Applications of Neural Networks in Learning of Dynamical Systems, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 22(1), 160-164.
- Corchero, M. A. M. G. Ortega and F. R. Rubio (2005). Robust H-Infinity Control Applied to a Solar Plant, *Proc. of the 16<sup>th</sup> IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic.
- Craig, I. K. and I. M. MacLeod (1995). Specification framework for robust control of a run-of-mine ore milling circuit. *Control Eng. Practice*, 3(5), 621-630.
- Cunha, J., J. Henriques, M. Rela and J. Silva (2002). Reset-Driven Fault Tolerance. *Proc. of the 4<sup>th</sup> European Dependable Computing Conference (EDCC-4)*, Toulouse, France.
- Cunha, J. (2003). *Low-Cost Fault Tolerance for Continuous Real-Time Control Systems*. PhD Thesis, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Cybenko, G. (1989). Approximation by superposition of a sigmoidal function, *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 2(3), 303-314.
- Dalton, T., R. Patton and J. Chen (1996). An application of eigenstructure assignment to robust residual design for FDI. *Proc. of the UKACC Int. Conference on Control (CONTROL '96)*, Exter, UK, 78-83.
- Dardinier-Marón, V., F. Hamelin and H. Noura (1999). A fault-tolerant control design against major actuator failures: Application to a three tank system. *Proc. of the 38<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*. Phoenix, Arizona, USA.
- de Gaston, R. and M. G. Safonov (1988). Exact calculation of the multiloop stability margin. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 33, 156-171.
- de Kleer, J. and J. Kurien (2003). Fundamentals of model-based diagnosis, *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 25-36.
- Demetriou, M. (2001a). Adaptive reorganization of switched systems with faulty actuators. *Proc. of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'01)*. Orlando, Florida, USA.

- Demetriou, M. (2001b). Utilization of LMI methods for fault tolerant control of a flexible cable with faulty actuators. *Proc. of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'01)*. Orlando, Florida, USA.
- Desoer, C. A. and M. Vidyasagar (1975). *Feedback Systems: Input-Output Properties*, Academic Press, New York.
- Diao, Y. and K. Passino (2001). Fault tolerant stable adaptive fuzzy/neural control for a turbine engine. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 9(3), 494–509.
- Diao, Y. and K. Passino (2002). Intelligent fault-tolerant control using adaptive and learning methods. *Control Engineering Practice*, 10(8), 801–817.
- Ding, S. X., S. Schneider, E.L. Ding and A. Rehm (2005). Advanced model-based diagnosis of sensor faults in vehicle dynamics control systems, *Proc. of the IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic.
- Dionísio, R., E. Moska, J. Lemos and P. Shirley (2003). Adaptive fault tolerant control with adaptive residual generation. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 283–288.
- Doyle, J. C. and G. Stein (1981). Multivariable Feedback Design: Concepts for a classical/Modern Synthesis. *IEEE Transactions Automatic Control*, 26, 4-16.
- Doyle, J. C. (1982). Analysis of feedback systems with structured uncertainties. *IEE Proceedings – Part D*, 129, 242–250.
- Doyle, J. C. (1985). Structured uncertainty in control system design. *Proc of the 24<sup>th</sup> IEEE Conf. on Decision and Control*, 260–265.
- Doyle, J. C. (1987). A review of  $\mu$ : For case studies in robust control. *Proc. of the 10<sup>th</sup> IFAC World Congress*, Munich, Germany, 395–402.
- Doyle, J. C.; K. Glover, P. Khargonekar and B. Francis (1989). State-space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34(8), 831-847.

- Draye, J., D. Pavisic, G. Cheron and G. Libert (1996). Dynamical Recurrent Neural Networks: A Dynamical Analysis, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics – Part B: Cybernetics*, 26, 692-706.
- El-Farra, N. H., A. Gani and P. Christofides (2005). Fault-Tolerant Control of Process Systems using Communication Networks. *AIChE Journal*, 51(6), 1665–1682.
- Elman, J. (1990). Finding Structure in Time, *Cognitive Science*, 14, 179-211.
- Elman, J. (1998). *Connectionism, Artificial Life and Dynamical Systems: New Approaches to Questions*, in A Companion to Cognitive Science, W. Bechtel e Graham (eds.), Oxford: Basil Blackwood.
- Engell, S. (1995). Design of robust control systems with time-domain specifications. *Control Eng. Practice*, 3(3), 365-372.
- Ericsson, S., N. Grip, E. Johansson, L. Persson, R. Sjöberg and J. Strömberg (2005). Towards automatic detection of local bearing defects in rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 9, 509-535.
- Eykhoff, P. (1987). *System Identification: History, Systems & Control Encyclopedia*, (M. Singh, eds.), Pergamon Press.
- Eberhardt, R. and D. Ward (1999). Indirect adaptive flight control system interactions. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 9, 1013–1031.
- Fan, M. and A. Tits (1986). Characterization and efficient computation of the structured singular value. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 31, 734–743.
- Fan, M., A. Tits and J. C. Doyle (1991). Robustness in the presence of mixed parametric uncertainty and unmodeled dynamics. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 36, 25–38.
- Favoreel, W. (1999). *Subspace Methods for Identification and Control of Linear and Bilinear Systems*, PhD Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven.
- Fei, J., S. Chen, G. Tao and S. Joshi (2003). A discrete-time robust adaptive actuator failure compensation control scheme. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 423–428.

- Fekri, S., M. Athans and A. Pascoal (2004). A New Robust Adaptive Control Method Using Multiple Models. *Proc. of the 12<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'04*, Kusadasi, Turkey.
- Fenton, W., T. M. McGinnity and L. P. Maguire (2001). Fault Diagnosis of Electronics Systems Using Intelligent Techniques: A Review, *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, 31(3), 269–280.
- Ferreira, P. (2002). Tracking with sensor failures. *Automatica*, 38(9), 1621–1623.
- Fliess, M., C. Join and H. Sira-Ramírez (2004). Robust residual generation for linear fault diagnosis: an algebraic setting with examples', *Int. Journal of Control*, 77, 1223–1242.
- Fliess, M., C. Join and H. Sira-Ramirez (2005). Closed-loop fault-tolerant control for uncertain nonlinear systems, *Symposium on Nonlinear Control and Observer Design*, Stuttgart, Lect. Notes Control Informat. Sci., Springer.
- Frank, P.M. and X. Ding (1997). Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. *Journal of Process Control*, 7(6), 403-424.
- Frank, P.M., S. Ding and B. Koppen-Seliger (2000a). Current developments in the theory of FDI. *Proc. of the 4<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2000)*. Budapest, Hungary, 16-27.
- Frank, P., E A. Garcia and B. Koppen-Seliger (2000b), Modelling for fault detection and isolation versus modelling for control, *Mathematics and computers in simulation*, 53, 259-271.
- Fray, C., H. Kuntze and K. Giesen (2003). A neuro-fuzzy based fault tolerant control concept for smart multy-sensory robots. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 573–578.
- Frei, C., F. Kraus and M. Blanke (1999). Reconfigurability viewed as a system property. *Proc. of the 5<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'99)*. Karlsruhe, Germany.

- Fryxell, D., P. Oliveira, A. Pascoal and C. Silvestre (1994). Modeling, Identification and Control of Autonomous Underwater Vehicles. *Proc. of Controlo'94*, IST, Lisboa, Portugal.
- Fuente M. J. and T. A. Derán (2001). Fault Tolerant Control Based on Multiple Linear Models in a Chemical Reactor. *Proc. of the 6<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'01)*, Porto, Portugal.
- Ganguli, S., A. Marcos and G. Balas (2002). Reconfigurable LPV control design for Boeing 747-100/200 longitudinal axis. *Proc. of the American Control Conference (ACC'02)*. Anchorage, AK, USA, 3612–3617.
- Gao, Z. and P. Antsaklis (1991). Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems. *International Journal of Control*, 53(3), 717–729.
- Gao, Z. and P. Antsaklis (1992). Reconfigurable control system design via perfect model following. *International Journal of Control*, 56(4), 783–798.
- Gaspar, P., I. Szaszi and J. Bokor (2003). Fault-tolerant control structure to prevent the rollover of heavy vehicles. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 465–470.
- Ge, J. and P. Frank (1995). Stochastic stability for discrete time linear active fault tolerant control systems. *Proc. of the 8<sup>th</sup> International Symposium on System Modeling and Control*. Zakopane, Poland, 273–278.
- Ge, J. and C. Lin (1996).  $H_\infty$  control for discrete-time active fault tolerant control systems. *Proc. of the 13<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC*. San Francisco, USA, 439–444.
- Ge, J., P. Frank and C. Lin (1996). Design of reliable controller for state delayed systems. *European Journal of Control*, 2, 239–248.
- Gehin, A. and M. Staroswiecki (1999). A formal approach to reconfigurability analysis application to the three tank benchmark. *Proc. of the 5<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'99)*. Karlsruhe, Germany.
- Gertler, J. (1998). *Fault detection and diagnosis in engineering systems*, Marcel Dekker, New York.

- Gertler, J. (2000). Designing dynamic consistency relations for fault detection and isolation. *International Journal of Control*, 73(8), 720-732.
- Gil, P., A. Cardoso, J. Henriques, P. Carvalho, H. Duarte-Ramos and A. Dourado (2003), Experiments with an Adaptive Model-Based Predictive Controller Applied to a Distributed Solar Collector Field: Performance and Fault Tolerance Assessment, *Proc. of the 3<sup>rd</sup> IHP Workshop at Plataforma Solar de Almería*, Almería, Spain.
- Girosi, F. and T. Poggio (1990). Networks and the Best Approximation Property, *Biological Cybernetics*, 63, 169-176.
- Gopinathan, M., J. Boskovic, R. Mehra and C. Rago (1998). A multiple model predictive scheme for fault-tolerant flight control design. *Proc. of the 37<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control*. Tampa, Florida, USA, 1376–1381.
- Griffin, G. and P. Maybeck (1997). MMAE/MMAC control for bending with multiple uncertain parameters. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 33(3), 903–911.
- Grimmelius, H., P. Meiler, H. Maas, B. Bonnier, J. Grevink and R. van Kuilenburg (1999). Three state-of-the-art method for condition monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(2), 401–416.
- Hajiyev, C. and F. Caliskan (2003). *Fault Diagnosis and Reconfiguration in Flight Control Systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Hamada, Y., S. Shin and N. Sebe (1996). A design method for fault-tolerant control systems based on  $H_\infty$  optimization. *Proc. of the 35<sup>th</sup> Conference on Decision and Control (CDC'96)*. Kobe, Japan, 1918–1919.
- Hammouri, H., M. Kinnaert and E. El Yaagoubi (1999). Observer-based approach to fault detection and isolation for non-linear systems, *IEEE Trans. Automatic Control*, 1999, 44, (10), 1879–1884.
- Hamscher, W., L. Console and J. de Kleer (Eds.) (1992). *Readings in Model-Based Diagnosis*. Morgan Kaufmann Publishers.
- Haykin, S. (1994). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall.

- Heiming, B. and J. Lunze (1999). Definition of the three-tank benchmark problem for controller reconfiguration. *Proc. of the 5<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'99)*. Karlsruhe, Germany.
- Henriques, J., A. Cardoso and A. Dourado (1999). Supervision and C-Means Clustering of PID Controllers for a Solar Power Plant, *J. Journal of Approximate Reasoning*, 22(1-2), 73-91.
- Higham, E. and S. Perovic (2001). Predictive maintenance of pumps based on signal analysis of pressure and differential pressure (flow) measurements. *Trans. of the Institute of Measurement and Control*, 23(4), 226-248.
- Ho, L. and G. Yen (2001). Reconfigurable control system design for fault diagnosis and reconfiguration. *Proc. of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'01)*. Orlando, Florida, USA.
- Höfling, T. and R. Isermann (1996). Fault detection based on adaptive parity equations and single-parameter tracking. *Control Engineering Practice*, 4(10), 1361–1369.
- Holderbaum, W., K. J. Hunt and H. Gollee (2002). Applications of  $H_{\infty}$  Robust Control to Paraplegic Standing. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.
- Hsieh, C. (2002). Performance gain margins of the two-stage LQ reliable control. *Automatica*, 38(11), 1985–1990.
- Humusoft (1997). *User's Manual of the Data Acquisition Card – AD 512*. Humusoft, Czech Republic. (<http://www2.humusoft.cz/www/datacq/manuals/ad512um.pdf>).
- Humusoft (1999). *User's Manual of the Extended Real Time Toolbox for use with Matlab/Simulink*. Humusoft, Czech Republic.
- Huzmezan, M., and J. Maciejowski (1997). *Reconfigurable control methods and related issues – a survey*. Technical Report. Department of Engineering, University of Cambridge.
- Huzmezan, M. and J. Maciejowski (1998a). Automatic tuning for model based predictive control during reconfiguration. *Proc. of AERO*. Seoul, South Korea.
- Huzmezan, M. and J. Maciejowski (1998b). A novel strategy for fault tolerant control. *Proc. of the COSY Workshop*. Mulhouse, France.

- Huzmezan, M. and J. Maciejowski (1998c). Reconfiguration and scheduling in flight using quasi-LPV high-fidelity models and MBPC control. *Proc. of the American Control Conference (ACC'98)*. Philadelphia, USA.
- Huzmezan, M. and J. Maciejowski (1999). Reconfigurable flight control during actuator failures using predictive control. *Proc. of the 14<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC*. Beijing, China.
- Ichtev, A., J. Hellendoorn, R. Babuska and S. Mollov (2002). Fault-Tolerant Model-Based Predictive Control Using Multiple Takagi-Sugeno Fuzzy Models. *Proc. of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Honolulu, Hawaii, Vol. 1, 346–351.
- Ikeda, K. and S. Shin (1998). Fault tolerance of autonomous decentralized adaptive control systems. *International Journal of Systems Science*, 29(7), 773–782.
- Isermann, R. (1994). Integration of fault detection and diagnosis methods. *Proc. of IFAC SAFEPROCESS'94*, Helsinki, Finland, 597-612.
- Isermann, R. (1997). Supervision, Fault-Detection and Fault-Diagnosis Methods – An Introduction, *Control Eng. Practice*, 5(5), 639-652.
- Isermann, R. (2006). *Fault-Diagnosis Systems – An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer.
- Isermann, R. and P. Ballé (1997). Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control Engineering Practice*, 5(5), 709-719.
- Izadi-Zamanabadi, R. and M. Blanke (1998). *Ship propulsion system as benchmark for fault-tolerant control*. Technical Report, Control Engineering Dep., Aalborg University, Denmark.
- Izadi-Zamanabadi, R. and M. Blanke (1999). A ship propulsion system model for fault-tolerant control. *Control Engineering Practice*, 7(2), 227–239.
- Izadi-Zamanabadi, R. and M. Staroswiecki (2000). A structural analysis method formulation for fault-tolerant control system design. *Proc. of the 39<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'00)*. Sydney, Australia.



- Izadi-Zamanabadi, R. (2005). Fault Diagnosis Problem and Structural Analysis Approach, *Proc. of the 17<sup>th</sup> IMACS World Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation*, Paris, France.
- Jakubek, S. and H. Jorgl (2000). Fault-diagnosis and fault-compensation for non-linear systems. *Proc. of the American Control Conference (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA, 3198–3202.
- Jamouli H., D. Sauter, J. Y. Keller and J. C. Ponsart (2005). Design of Augmented Fault Detection Filter for Fault Tolerant Control. *Proc. of the IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic.
- Jiang, B., M. Staroswiecki and V. Cocquempot (2003). Active fault tolerant control for a class of nonlinear systems. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 127-132.
- Jiang, J. and Y. Zhang (2002). Graceful performance degradation in active fault-tolerant control systems. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.
- Jin, L., N. Nikiforuk and M. Gupta (1995). Approximation of discrete time state space trajectories using dynamic recurrent networks. *IEEE Trans. Automatic Control*, 40(7), 1266-1270.
- Johansson, R. (1993). *System Modeling & Identification*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- Join C., H. Sira-Ramirez and M. Fliess (2005). Control of an uncertain three-tank system via on-line parameter identification and fault detection. *Proc. World IFAC Conference*, Prague, Czech Republic.
- Jonckheere, E. A. and P. Lohsoonthorn (2000). A geometric approach to model matching reconfigurable propulsion control, *Proc. American Control Conference (ACC'2000)*, Chicago, IL, 2388-2392.
- Jones, C. (2002). *Reconfigurable flight control*. Technical Report, Control Group, Department of Engineering, University of Cambridge, UK.

- Jordan, M. (1986). Attractor Dynamics and Parallelism in a Connectionist Sequential Machine, *Proc. of 8<sup>th</sup> Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Hillsdale, NJ, USA, 531-546.
- Joshi, S. (1997). Design of failure accommodating multiloop LQG-type controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 32(8), 740–741.
- Juuso, E. K. (2005). Modelling and Control of a Solar Thermal Power Plant. *Proc. World IFAC Conference*, Prague, Czech Republic.
- Kalman, R. (1964). When is a Control System Optimal?, *American Society of Mechanical Engineers Transactions Series D: Journal of Basic Engineering*, 86, 1-10.
- Kanev, S. and M. Verhaegen (2000a). A bank of reconfigurable LQG controllers for linear systems subjected to failures. *Proc. of the 39<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'00)*. Sydney, Australia.
- Kanev, S. and M. Verhaegen (2000b). Controller reconfiguration for non-linear systems. *Control Engineering Practice*, 8(11), 1223–1235.
- Kanev, S. and M. Verhaegen (2002). Reconfigurable Robust Fault-Tolerant Control and State Estimation, *Proc. of the 15<sup>th</sup> IFAC World Congress on Automatic Control*, Barcelona, Spain.
- Kanev, S. and M. Verhaegen (2003a). Controller reconfiguration in the presence of uncertainty in the FDI. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA.
- Kanev, S. and M. Verhaegen (2003b). Robust output-feedback integral MPC: A probabilistic approach. *Proc. of the 41<sup>st</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'03)*. Maui, Hawaii, USA. Vol. 2, 1914-1919
- Keating, M., M. Pachter and C. Houppis (1997). Fault tolerant flight control system: QFT design. *International Journal of Robust and NonLinear Control*, 7(6), 551–559.
- Kececi, E., X. Tang and G. Tao (2003a). Adaptive actuator failure compensation for concurrently actuated manipulators. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 411–416.

- Kececi, E., X. Tang and G. Tao (2003b). Adaptive actuator failure compensation for cooperating multiple manipulator systems. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 417–422.
- Kerrigan, E. and J. Maciejowski (1999). Fault-tolerant control of a ship propulsion system using model predictive control. *Proc. of the 5<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'99)*. Karlsruhe, Germany.
- Khosrowjerdi, M. J., R. Nikoukhah and N. Safari-Shad (2002). *A Mixed  $H_2/H_\infty$  Approach to Simultaneous Fault Detection and Control*, Tech. Rep. n° 0263, INRIA.
- Kiencke, U. (1997). Diagnosis of automotive systems. *Proc. of the IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'1997)*. Hull, UK.
- Kim, S., Y. Kim, H. Kim and C. Nam (2001a). Adaptive reconfigurable flight control system based on recursive system identification. *Proc. of the JSASS 15<sup>th</sup> International Sessions in the 39<sup>th</sup> Aircraft Symposium*. Gifu, Japan.
- Kim, Y., G. Rizzoni and V. Utkin (2001b). Developing a fault-tolerant power-train control system by integrating design of control and diagnostics. *International Journal of Robust and NonLinear Control*, 11, 1095–1114.
- Kinnaert, M. (2003). Fault diagnosis based on analytical models for linear and nonlinear systems – a tutorial. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 37-50.
- Konstantopoulos, I. And P. Antsaklis (1995). *An optimization strategy to reconfigurable control systems*. Technical Report ISIS-95-006. University of Notre Dame, ISIS group.
- Konstantopoulos, I. And P. Antsaklis (1996a). An eigenstructure assignment approach to control reconfiguration. *Proc. of 4<sup>th</sup> IEEE Mediterranean Symposium on Control and Automation*, Chania, Crete, Greece, 328-333.
- Konstantopoulos, I. And P. Antsaklis (1996b). *Eigenstructure assignment in reconfigurable control systems*. Technical Report ISIS-96-001, University of Notre Dame, ISIS group.

- Konstantopoulos, I. and P. Antsaklis (1999). An optimization approach to control reconfiguration. *Dynamics and Control*, 9(3), 255–270.
- Kothare, M., V. Balakrishnan and M. Morari (1996). Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. *Automatica*, 32(10), 1361–1379.
- Kovács házy, T., G. Péceli and G. Simon (2001). Transient reduction in reconfigurable control systems utilizing structure dependence. *Proc. of the Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Budapest, Hungary, 1143–1147.
- Kremer, S. (1995). On the Computational Power of Elman-Style Recurrent Networks, *IEEE Trans. on Neural Networks*, 6, 1000-1004.
- Kwakernaak, H. (1993) Robust Control and  $H_\infty$  Optimization - Tutorial Paper. *Automatica*, 29(2), 255-273.
- Larsson, M. (1999). Behavioral and Structural Model Based Approaches to Discrete Diagnosis. PhD Thesis, Linköping University, Sweden.
- Lemos, J., L. Rato and J. Marques (1999). Switching reconfigurable control based on hidden Markov models. *Proc. of the European Control Conference (ECC'99)*. Karlsruhe, Germany.
- Lee, C. (1990). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller – parts 1 and 2. *IEEE Trans. Systems Man Cybernetics*, 20, 404-435.
- Leonhardt, S. and M. Ayoubi (1997), Methods of Fault Diagnosis. *Control Eng. Practice*, 5(5), 683-692.
- Liang, Y., D.C. Liaw and T.C. Lee (2000). Reliable control of non-linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(4), 706–710.
- Liao, F., J. Wang and G. Yang (2002). Reliable robust tracking control: An LMI approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10(1), 76–89.
- Liaw, D. and Y. Liang (2002). Quadratic polynomial solutions to the Hamiltonian-jacobi inequality in reliable control design. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, E81-A(9), 1860-1866.

- Lions, J. L. (1996). *ARIANE 5 Flight 501 Failure*. Report by the Inquiry Board. Paris, ESA.
- Liu, W. (1996). An on-line expert system-based fault-tolerant control system. *Expert Systems with Applications*, 11(1), 59–64.
- Liu, G. and R. Patton (1998). *Eigenstructure Assignment for Control Systems Design*. John Wiley & Sons.
- Liu, G. P., G. R. Duan and R. J. Patton (2000). Mixed time-and frequency-domain robust eigenstructure assignment, *Int. J. Sys. Sci.*, 31 (1), 63-71.
- Ljung, L. and J. Sjöberg (1992). A System Identification Perspective on Neural Nets, in *IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing*, S. Kung (eds.).
- Ljung, L. (1996). Development of System Identification, *Proc. of the 13th World Congress of IFAC*, 141-146.
- Ljung, L. (1999). *System Identification: Theory for the User*, Prentice-hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Looze, D., J. Weiss, J. Eterno and N. Barrett (1985). An automatic redesign approach for restructurable control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 5(2), 16–22.
- López, J. (1996). Acurex filed d.a.s. and control system. *Internal Report 08/96*, Plataforma Solar de Almería, Espanha.
- Lopez-Toribio, C., R. Patton and S. Daley (1999). Supervisory Takagi-Sugeno fuzzy fault tolerant control of a rail traction system. *Proc. of the 14<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC*. Beijing, China.
- Luenberger, D. (1966). Observers for Multivariable Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11(2), 190-197.
- Luenberger, D. (1971). An introduction to Observers, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 16, 596-602.
- Lundström, P., S. Skogestad and Z.-Q. Wang (1991). Performance weight selection for  $H$ -infinity and  $\mu$ -control methods. *IEEE Transactions on Measurement and Control*, 13(5), 241-252.

- Lundström, P., S. Skogestad and J. C. Doyle (1993a). Two Degree of freedom Controller design for an ill-conditioned plant using  $\mu$ -synthesis. *Proc. of the 2<sup>nd</sup> European Control Conference ECC*, Holland, 969-974.
- Lundström, P., Z. Q. Wang and S. Skogestad (1993b). Modeling of gain and delay uncertainty in the structured singular value framework. *Proc. of the IFAC Word Congress*, Sydney, Australia.
- Lunze, J. (1988). *Robust Multivariable Feedback Control*. Prentice Hall, London.
- Lunze, J. and J. Schroder (1999a). Application of qualitative observation and prediction to a neutralisation process. *Proc. of the 14<sup>th</sup> IFAC Congress*. Beijing, China, 49-54.
- Lunze, J. and J. Schroder (1999b). Process diagnosis based on a discrete-event description. *Automatisierungstechnik*, 47(8), 358-365.
- Lunze, J., J. Askari-Marnani, A. Cela, P. M. Frank, A.-L. Gehin, B. Heiming, J. M. Lemos, T. Marcu, L. Rato and M. Staroswiecki (2001). Three-tank Control Reconfiguration. In *Control of Complex Systems* (Eds.: K. Astrom, P. Alberto, M. Blanke, A. Isidori, W. Schaufelberger and R. Sanz), Springer-Verlag, Chapter 12, 241-283.
- Maciejowski, J. and C. Jones (2003). MPC fault-tolerant flight control case study: Flight 1862. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 121-126.
- Maghami, P., D. Sparks and K. Lim (1998). Fault accommodation in control of flexible systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 21(3), 500-507.
- Mahmoud, M., J. Jiang and Y. Zhang (1999). Analysis of the stochastic stability for fault tolerant control systems. *Proc. of the 38<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*. Phoenix, Arizona, USA.
- Mahmoud, M., J. Jiang and Y. Zhang (2000a). Optimal control law for fault tolerant control systems. *Proc. of the 39<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'00)*. Sydney, Australia.

- Mahmoud, M., J. Jiang and Y. Zhang (2000b). Stochastic stability of fault tolerant control systems in the presence of noise. *Proc. of the American Control Conference (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA.
- Mahmoud, M., J. Jiang and Y. Zhang (2000c). Stochastic stability of fault tolerant control systems in the presence of model uncertainties. *Proc. of the American Control Conference (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA.
- Mahmoud, M., J. Jiang and Y. Zhang (2001). Stochastic stability analysis of fault-tolerant control systems in the presence of noise. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(11), 1810–1815.
- Mahmoud, M., J. Jiang and Y. Zhang (2002). Stability of fault tolerant control systems driven by actuators with saturation. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.
- Mahmoud, M., J. Jiang and Y. Zhang (2003). *Active Fault Tolerant Control Systems: Stochastic Analysis and Synthesis*. Springer-Verlag, Berlin.
- Maki, M., J. Jiang and K. Hagino (2001). A stability guaranteed active fault-tolerant control system against actuator failures. *Proc. of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'01)*. Orlando, Florida, USA.
- Mangoubi, R. S. and A. M. Edelmayer (2000). Model Based Fault Detection: The Optimal Past, The Robust Present and A Few Thoughts On The Future. *Proc. of the 4<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'00)*. Budapest, Hungary, 64–75.
- Marcos, A., S. Ganguli and G. Balas (2003). New strategies for fault tolerant control and fault diagnostic. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 277–282.
- Marcos, A. and G. Balas (2005). A robust integrated controller/diagnosis aircraft application. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 15, 531–551.
- Marcu, T., M. Matcovschi and P. Frank (1999). Neural observer-based approach to fault tolerant control of a three-tank system. *Proc. of the 5<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'99)*. Karlsruhe, Germany.

- Maybeck, P. and R. Stevens (1991). Reconfigurable flight control via multiple model adaptive control methods. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 27(3), 470–479.
- Maybeck, P. (1999). Multiple model adaptive algorithms for detecting and compensating sensor and actuator/surface failures in aircraft flight control systems. *International Journal of Robust and NonLinear Control*, 9, 1051–1070.
- Médar, S., P. Charbonnaud and F. Noureddine (2002a). Active fault accommodation of a three tank system via switching control. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.
- Médar, S., P. Charbonnaud and F. Rotella (2002b). Hybrid Modeling of a Switching-based Reconfiguration Strategy. *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 677-682, Hammamet, Tunisia.
- Mendonça, T., P. Lago, H. Magalhães, A. J. Neves and P. Rocha (2002). On-line Multiple Model Switching Control Implementation: A Case Study, *Proc. of the 6<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'01)*, Porto, Portugal.
- Mhaskar, P., A. Gani and P. D. Christofides (2006). Fault-Tolerant Control of Nonlinear processes: Performed-based Reconfiguration and Robustness. *International Journal of Robust and NonLinear Control*, 16, 91–111.
- Mohamed, S., A. El-Shafei, A. Bahgat and M. Hallouda (1997). Adaptive-control and fault diagnosis implementation using an industrial computer system. *Proc. of the American Control Conference (ACC'97)*. NewMexico, USA, 57–61.
- Morari, M. and E. Zafiriou (1989). *Robust Process Control*. Prentice-Hall International.
- Morse, W. and K. Ossman (1990). Model-following reconfigurable flight control system for the AFTI/F-16. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 13(6), 969–976.
- Morse, A. S. (1990). Model-following reconfigurable flight control system for the AFTI/F-16. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 13(6), 969–976.
- Morse, A. S. (1995). *Control Using Logic-Based Switching*, Trends in Control, Editor: A. Isidori, Springer-Verlag, 69-113.



- Morse, A. S. (1996). Supervisory Control of Families of Linear Set-Point Controllers - Part 1: Exact Matching, *IEEE Trans. Automatic. Control*, 41(10), 1413-1431.
- Morse, A. S. (1997). Supervisory Control of Families of Linear Set-Point Controllers - Part 2: Robustness, *IEEE Trans. Automatic Control*, 42(11), 1500-1515.
- Murad, G., I. Postlethwaite and D. Gu (1996). A robust design approach to integrate controls and diagnostics. *Proc. of the 13<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC*. San Francisco, USA, 199–204.
- Musgrave, J., T. Guo, E. Wong and A. Duyar (1997). Real-time accommodation of actuator faults on a reusable rocket engine. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 5(1), 100–109.
- Nett, C. N., C. A. Jacobson and A. T. Miller (1988), An integrated approach to controls and diagnostics: The 4-parameter controller, *Proc. of the 1988 American Control Conference*, Atlanta, USA, 824-835.
- Niemann, H. and J. Stoustrup (1997). Integration of Control and Fault Detection: Nominal and Robust Design, *Proc. of the IFAC Symposium SAFEPROCESS'97*, UK, 341-346.
- Niemann, H. and J. Stoustrup (2002). Reliable control using the primary and dual Youla parametrizations. *Proc. of the 41<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'02)*. Las Vegas, Nevada, USA, 4353-4358.
- Niemann, H. and J. Stoustrup (2003). Passive fault tolerant control of a double inverted pendulum – a case study example. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 1029-1034.
- Niksefat, N. and N. Sepehri (2002). A QFT fault-tolerant control for electrohydraulic positioning systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10(4), 626–632.
- Noura, H., T. Bastogne and V. Dardinier-Marion (1999). A general fault tolerant control approach: Application to a winding machine. *Proc. of the 38<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*. Phoenix, Arizona, USA.

- Noura, H., D. Sauter, F. Hamelin and Theilliol (2000). Fault-tolerant control in dynamic systems: Application to a winding machine. *IEEE Control Systems Magazine*, 20(1), 33-49.
- NTSB (1979). *Aircraft accident report – American Airlines, Inc. DC-10-10*. Technical Report NTSB-AAR-79-17, National Transportation Safety Board, USA.
- Nyberg M. and M. Krysander (2003), Combining AI, FDI, and statistical hypothesis-testing in a framework for diagnosis. Proc. of the IFAC Safeprocess'03, Washington, USA.
- Ordys, A.W. (1994), *Modeling and Simulation of Power Generation Plants*. Springer-Verlag.
- Ortega, M. G. and F. R. Rubio (2004). Systematic design of weighting matrices for the  $H_\infty$  mixed sensitivity problem. *Control Eng. Practice*, 14, 89-98.
- Packard, A, M. K. Fan and J. C. Doyle (1988). A power method for the structured singular value. *Proc. of the 27<sup>th</sup> IEEE Conf. on Decision and Control*, Austin, Texas, 2132-2137.
- Packard, A, and J. C. Doyle (1993). The complex structured singular value. *Automatica, Special Issue on Robust Control*, 29, 71-109.
- Packard, A, and P. Pandey (1993). Continuity properties of the real/complex structured singular value. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38, 415-428.
- Patton, R., P. Frank and P. Clark (editors) (1989). *Fault diagnosis in dynamic systems, theory and applications*, Prentice-Hall, London.
- Patton, R. (1991), Fault Detection and Diagnosis in aerospace systems using analytical redundancy. *IEE Computing & Control Eng. Journal*, 2(3), 127-136.
- Patton, R. (1997a), Fault Tolerant Control: the 1997 situation. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'97)*. Hull, UK, 1033-1054.
- Patton, R. (1997b), Observer-Based Fault Detection and Isolation: Robustness and Applications. *Control Eng. Practice*, 5(5), 671-682.

- Patton, R. and J. Chen (Eds.) (1997). *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'97)*, Pergamon.
- Patton, R., P. Frank and P. Clark (editors) (2000). *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*, Springer, New York.
- Patton, R. J., F. J. Uppal and C. J. Lopez-Toribio (2000). Soft Computing Approaches To Fault Diagnosis For Dynamic Systems: A Survey. *Proc. of the 4<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'00)*. Budapest, Hungary, 298–311.
- Patton, R., C. Kambhampati and F. Uppal (2005). Challenges of Networked Control Systems: Autonomy, Reconfiguration and Plug-and-Play. *Proc. of the 1<sup>st</sup> Workshop on Networked Control System and Fault Tolerant Control*. Ajaccio, France.
- Petersen, I. R. and D. C. McFarlane (2004). A methodology for robust fault detection in dynamic systems. *Control Engineering Practice*, 12, 123-138.
- Pham, D. and L. Xing (1995). Dynamic System Identification Using Elman and Jordan Networks, *Neural Networks for Chemical Engineers*, A. Bulsari (eds.), Elsevier Science.
- Podder, T. and N. Surkar (2001). Fault-tolerant control of an autonomous underwater vehicle under thruster redundancy. *Robotics and Autonomous Systems*, 34, 39–52.
- Ponsart, J., C. Join, D. Theilliol and D. Sauter (2001). Sensor fault diagnosis and accommodation in nonlinear system. *Proc. of the 6<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'01)*, Porto, Portugal.
- Poznyak, A., W. Yu, E. Sanchez and J. Perez (1999). Nonlinear Adaptive Trajectory Using Dynamic Neural Networks, *IEEE Trans. on Neural Networks*, 10, 1402-1411.
- Puig, V. and J. Quevedo (2001). Fault-tolerant PID controllers using a passive robust fault diagnosis approach. *Control Engineering Practice*, 9, 1221–1234.

- Qu, Z., C. Ihlefeld, J. Yufang and A. Saengdeejing (2001). Robust control of a class of nonlinear uncertain systems - fault tolerance against sensor failures and subsequent recovery. *Proc. of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'01)*. Orlando, Florida, USA.
- Rato, L. and M. Lemos (1999). Multimodel based fault tolerant control of the 3-tank system. *Proc. of the 5<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'99)*. Karlsruhe, Germany.
- Rato, L. (2002). *Controlo Comutado Baseado em Modelos Múltiplos*. PhD Thesis, IST, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- Rauch, H., 1994. Intelligent fault diagnosis and control reconfiguration. *IEEE Control System Magazine*, 14(3), 6–12.
- Rauch, H. (1995). Autonomous control reconfiguration. *IEEE Control Systems Magazine*, 15(6), 37-48.
- Redheffer, R. M. (1950). Remarks on the basis of network theory. *Journal of Mathematics and Physics*, 28, 237-258.
- Redheffer, R. M. (1960). On a certain linear fractional transformation. *Journal of Mathematics and Physics*, 39, 269-286.
- Ribeiro, B. (2001). Support Vector Machines and RBF Neural Networks For Fault Detection and Diagnosis, *Proc. of the IEEE 8<sup>th</sup> International Conference on Neural Information Processing*, Vol. 2, 873-878.
- Rodrigues, M., D. Theilliol, M. Adam-Medina and D. Sauter (2006). A fault detection and isolation scheme for industrial systems based on multiple operating models, *Control Engineering Practice*, 40(9), 1555-1575.
- Russell, E., L. Chiang and R. Baatz (2000). *Data-driven techniques for fault detection and diagnosis in chemical processes*, Springer, London.
- Saberi, A., A. Stoorvogel, P. Sannuti and H. Niemann (2000). Fundamental problems in fault detection and identification, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 10, 1209-1236.
- Safonov, M. G. (1982). Stability margins of diagonally perturbed multivariable feedback systems, *IEE Proceedings – Part D*, 129, 251-256.

- Samar, R., I. Postlethwaite and D.-W. Gu (1995). Model reduction with balanced realizations, *International Journal of Control*, 62, 33-64.
- Sampath, M. R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen and D. C. Teneketzis (1995). Diagnosability of discrete event systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 40(9), 1555-1575.
- Sampath, M. R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen and D. C. Teneketzis (1996). Failure diagnosis using discrete-event models. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 4(2), 105-124.
- Sanz, R. and K.-E. Arzén (2003). Trends in Software and Control. *IEEE Control Systems Magazine*, 23(3), 12-15.
- Sauter, D., H. Frédéric, H. Noura, D. Theilliol (2002). Fault Tolerant Control in Dynamical Systems. *Proc. 15<sup>th</sup> Triennial World IFAC Congress*, Barcelona, Spain.
- Schdeier, G. and P. M. Frank (1999). Fault-tolerant ship propulsion control: sensor fault detection using a non-linear observer, *Proc. of the 5<sup>th</sup> European Control Conference - ECC'99*, Karlsruhe, Germany.
- Schram, G., G. Coppinga, P. Bruijn and H. Verbruggen (1998). Failure-tolerant control of aircraft: a fuzzy logic approach. *Proc. of the American Control Conference (ACC'98)*. Philadelphia, USA, 2281–2285.
- Schroder, J. (2002). *Modelling, State Observation and Diagnosis of Quantised Systems*. Springer-Verlag, Berlin.
- Seo, C. and B. Kim (1996). Design of robust reliable  $H_\infty$  output feedback control for a class of uncertain linear systems with sensor failure. *International Journal of Systems Science*, 27(10), 963–968.
- Seron, M., G. Goodwin and J. Don'a (1996). *Eigenstructure assignment in reconfigurable control systems*. Technical Report ISIS-96-001. University of Notre Dame, ISIS group.
- Sezginer, R. S. and M. L. Overton (1990). The largest singular value of  $e^X A_0 e^{-X}$  is convex on convex sets of commuting matrices. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35, 229–230.

- Shin, J., N. Wu and C. Belcasrto (2002). Linear parameter varying control synthesis for actuator failures based on estimated parameters. *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Monterey, California, USA.
- Shin, J. and C. Belcasrto (2003). Analysis of a fault tolerant control system: False fault detection case. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 289–294.
- Simani, S., C. Fantuzzi and R. Patton. (2003). *Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques*. Springer, London.
- Siwakosit, W. and R. Hess (2001). Multi-input/multi-output reconfigurable flight control design. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 24(6), 1079–1088.
- Sjöberg, J., H. Hjalmarsson and L. Ljung (1994). Neural Networks in System Identification, *Proc. 10<sup>th</sup> IFAC Symposium on Systems Identification*: 49-72.
- Sjöberg, J., Q. Zhang, L. Ljung, A. Benveniste, B. Deylon, P. Glorennec, H. Hjalmarsson and A. Juditsky (1995). Nonlinear Black-Box Modeling in System Identification: A Unified Overview, *Automatica*, 31, 1691-1724.
- Somov, Y., A. Kozlov, V. Rayevsky, G. Anshakov and Y. Antonov (2002). Nonlinear dynamic research of the spacecraft robust fault-tolerant control systems. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.
- Srinivasan, B., P. Huguenin, K. Guemghar and D. Bonvin (2002). A Global Stabilization Strategy for an Inverted Pendulum. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.
- Staroswiecki, M., G. Hoblos and A. Aitouche (1999). Fault tolerance analysis of sensor systems. *Proc. of the 38<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*. Phoenix, Arizona, USA.
- Staroswiecki, M. and A.-L. Gehin (2001). From Control to Supervision. *Annual Reviews in Control*, 25, 1-11.
- Staroswiecki, M. (2002). On reconfigurability with respect to actuator failures. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.

- Stengel, R. (1991). Intelligent failure-tolerant control. *IEEE Control Systems Magazine*, 11(4), 14-23.
- Still, U. and W. Zörner (1996). *Steam Turbine generators process control and diagnostics – modern instrumentation for the greatest economy of power plants*. Wiley-VCH, Weinheim.
- Stoustrup, J., M.J. Grimble and H. Niemann (1997). Design of integrated systems for the control and detection of actuator/sensor faults. *Sensors Review*, 138-149.
- Stoustrup, J. and H. Niemann (2001). Fault tolerant feedaback control using the Youla parametrization. *Proc. of the 6<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'01)*. Porto, Portugal.
- Stoustrup, J. and H. Niemann (2002). Fault estimation – a standard approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 12, 649-673.
- Suyama, K. and F. Zhang (1997). A new type of reliable control system using decision by majority. *Proc. of the American Control Conf. (ACC'97)*. New Mexico, USA.
- Suyama, K. (2002). What is reliable control? *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.
- Suzuki, T. and M. Tomizuka (1999). Joint synthesis of fault detector and controller based on structure of two degree of freedom control system. *Proc. of the 38<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*. Phoenix, Arizona, USA, 3599–3604.
- Takagi, T. and M. Sugeno (1985). Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control, *IEE Trans. Man Cybernetics*, 15, 116-132.
- Tao, G., X. Ma and S. Joshi (2000a). Adaptive output tracking control of systems with actuator failures. *Proc. of the American Control Conference (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA, 2654–2658.
- Tao, G., X. Ma and S. Joshi (2000b). Adaptive state feedback control of systems with actuator failures. *Proceedings of the American Control Conference (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA, Vol. 4, 2669-2673.
- Tao, G., X. Ma and S. Joshi (2001). Adaptive state feedback and tracking control of systems with actuator failures. *IEEE Trans. on Aut. Control*, 46(1), 78-95.

- Tao, G., S. Chen and S. Joshi (2002a). An adaptive actuator failure compensation controller using output feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(3), 506–511.
- Tao, G., S. Chen and S. Joshi (2002b). An adaptive control scheme for systems with unknown actuator failures. *Automatica*, 38(6), 1027–1034.
- Theilliol, D., H. Noura and D. Sauter (1998). Fault-tolerant control method for actuator and component faults. *Proc. of the 37<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'98)*. Tampa, Florida, USA, 604–609.
- Theilliol, D., J. Ponsart, H. Noura and D. Sauter (2001). Sensor fault-tolerant control method based on multiple model approach. *Proc. of the 6<sup>th</sup> European Control Conference (ECC'01)*. Porto, Portugal, 1981–1986.
- Theilliol, D., D. Sauter and J. Ponsart (2003). A multiple model based approach for fault tolerant control in non linear systems. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 151–156.
- Tortora, G., B. Kouvaritakis and D. Clarke (2002). Optimal accommodation of faults in sensors and actuators. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.
- Tsoi, A. and A. Bach (1997). Discrete Time Recurrent Network Architectures: A Unifying Review, *Neurocomputing*, 15, 183-223.
- Tyler, M. and M. Morari (1994). Optimal and robust design of integrated control and diagnostic modules. *Proc. of the American Control Conference (ACC'94)*. Baltimore, USA, 2060–2064.
- van Schrick, D. (1997). Remarks on terminology in the field of supervision, fault detection and diagnosis. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'97)*. Hull, UK, 959-964.
- van Shrick, D. (2002). Fault-tolerant control management – a conceptual view. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.



- Veillette, R. (1992). Design of reliable control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(3), 290-304.
- Veillette, R. (1995). Reliable linear-quadratic state-feedback control. *Automatica*, 31(1), 137-143.
- Venkatasubramanian, V., R. Rengaswamy, K. Yin and S. N. Kavuri (2003a). A review of process fault detection and diagnosis - Part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27, 293-311.
- Venkatasubramanian, V., R. Rengaswamy, K. Yin and S. N. Kavuri (2003b). A review of process fault detection and diagnosis - Part II: Qualitative models and search strategies. *Computers and Chemical Engineering*, 27, 313-326.
- Venkatasubramanian, V., R. Rengaswamy, K. Yin and S. N. Kavuri (2003c). A review of process fault detection and diagnosis - Part III: Process history based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27, 327-346.
- Verhaegen, M. and S. Kanev (2005). Robust Fault Tolerant Control, *Proc. of the 16<sup>th</sup> IFAC World Congress on Automatic Control*, Prague, Czech Republic.
- Visinski, M., J. Cavallaro and I. Walker (1995). A dynamic fault tolerance framework for remote robots. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 11(4), 477-490.
- Werbos, P. (1990). Backpropagation through time: what it does and how do it. *Proc. of the IEEE*, 78, 459-468.
- Wise, K., J. Brinker, A. Calise, D. Enns, M. Elgersma and P. Vougaris (1999). Direct adaptive reconfigurable flight control for a tailless advanced fighter aircraft. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 9, 999-1012.
- Whidborne, J. F., I. Postlethwaite and D. W. Gu (1992). *Robust Controller design using  $H_{\infty}$  loop-shaping and the method of inequalities*. Report 92-33, Department of Engineering, University of Leicester.
- Wonham, M. (1974). *Linear Multivariable Systems*, Springer-Verlag, Berlin.
- Wu, N. (1993). Reconfigurable control design: Achieving stability robustness and failures tracking. *Proc. of the 32<sup>nd</sup> Conference on Decision and Control (CDC'93)*. San Antonio, Texas, USA.

- Wu, N. (1997a). Reliability of reconfigurable control systems: a fuzzy set theoretic approach. *Proc. of the 36<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'97)*. San Diego, California, USA, 3352-3356.
- Wu, N. (1997b). Robust feedback design with optimized diagnostic performance. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 42(9), 1264-1268.
- Wu, N., Y. Zhang and K. Zhou (2000a). Detection, estimation, and accommodation of loss of control effectiveness. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 14, 775–795.
- Wu, N., K. Zhou and G. Salomon (2000b). Control reconfigurability of linear time-invariant systems. *Automatica*, 36(11), 1767–1771.
- Wu, N., K. Zhou and G. Salomon (2000c). On reconfigurability. *Proc. of the 4<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'00)*. Budapest, Hungary, 846–851.
- Wu, N. (2001a). Reliability of fault tolerant control systems: Part I. *Proc. of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'01)*. Orlando, Florida, USA.
- Wu, N. (2001b). Reliability of fault tolerant control systems: Part II. *Proc. of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'01)*. Orlando, Florida, USA.
- Wu, N. and R. Patton (2003). Reliability of supervisory control. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 139-144.
- Wu, N., S. Thavimani, Y. Zhang and M. Blanke (2003). Sensor fault masking of a ship propulsion system. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 435–440.
- Wu, N. (2004). Coverage in fault-tolerant control. *Automatica*, 40, 537–548.
- Yamakawa, Y., A. Yamada and H. Fujimoto (2005). State Dependent Switching Control for Inverted Pendulum System. *Proc. of the 16<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC*, Prague, Czech Republic.
- Yamé, J. and M. Kinnaert (2003). Performance-based switching for fault-tolerant control. *Proc. of the SAFEPROCESS'2003*. Washington D.C., USA, 555–560.

- Yang, G., J. Wang, and Y. Soh (1999). Reliable LQG control with sensor failures. *Proc. of the 38<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*. Phoenix, Arizona, USA.
- Yang, Z. and M. Blanke (2000a). Adaptive control mixer method for nonlinear control reconfiguration: A case study. *Proc. of the IFAC Symposium on System Identification (SYSID '00)*. Santa Barbara, California, USA.
- Yang, Z. and M. Blanke (2000b). The robust control mixer module method for control reconfiguration. *Proc. of the American Control Conference (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA.
- Yang, Z. and J. Stoustrup (2000). Robust reconfigurable control for parametric and additive faults with FDI uncertainties. *Proc. of the 39<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'00)*. Sydney, Australia.
- Yang, Z. and D. Hicks (2002). Reconfigurability of fault-tolerant hybrid control systems. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.
- Yen, G. (1994). Reconfigurable learning control in large space structures. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2(4), 362–370.
- Yen, G. and L. Ho (2000). Fault tolerant control: An intelligent sliding mode control. *Proc. of the American Control Conf. (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA, 4204–4308.
- Yen, G. and L. Ho (2003). Online Multiple-Model-Based Fault Diagnosis and Accommodation, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 50(2), 296–312.
- Yoshida, K. (1999). Swing-Up Control of a Inverted Pendulum by Energy-Based Methods. *Proc. of the American Control Conference (ACC'99)*, San Diego, California, USA, 4045–4047.
- Zadeh, L. (1962). *From Circuit Theory to System Theory*, Proc. IRE, 856-865.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets, *Inform. Control*, 8, 338-353.
- Zhang, Y. and J. Jiang (1999a). Design of integrated fault detection, diagnosis and reconfigurable control systems. *Proc. of the 38<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*. Phoenix, Arizona, USA.

- Zhang, Y. and J. Jiang (1999b). An interacting multiple-model based fault detection diagnosis and fault-tolerant control approach. *Proc. of the 38<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*. Phoenix, Arizona, USA.
- Zhang, Y. and J. Jiang (2000). Design of proportional-integral reconfigurable control systems via eigenstructure assignment. *Proc. of the American Control Conference (ACC'00)*. Chicago, Illinois, USA.
- Zhang, Y. and J. Jiang (2001). Integrated active fault-tolerant control using IMM approach. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 37(4), 1221-1235.
- Zhang, P., S. Ding, G. Wang, T. Jeinsch and D. Zhou (2002). Application of robust observer based FDI systems to fault-tolerant control. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.
- Zhang, Y. and J. Jiang (2002). Design of restructurable active fault-tolerant control systems. *Proc. of the 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of IFAC (b'02)*. Barcelona, Spain.
- Zhang, Y. and J. Jiang (2003). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control system. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 265-276.
- Zhao, G. and J. Jiang (1998). Reliable state feedback control system design against actuator failures. *Automatica*, 34(10), 1267–1272.
- Zhou, D., J. C. Doyle and K. Glover (1996). *Robust and Optimal Control*. Prentice-Hall, New-Jersey.
- Zhou, D. and P. Frank (1998). Fault diagnosis and fault tolerant control. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 34(2), 420–427.
- Zhou, K. (2000). A new controller architecture for high performance, robust, and fault tolerant control. *Proc. of the 39<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC'00)*. Sydney, Australia.
- Zhou, K. and Z. Ren (2001). A new controller architecture for high performance, robust, and fault-tolerant control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(10), 1613–1618.

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA INFORMÁTICA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA**

**Supervisão e Controlo de Sistemas Dinâmicos  
com Tolerância a Falhas – Contribuição para  
uma abordagem estruturada e robusta**

Alberto Jorge Lebre Cardoso

***ADENDA***

à

Tese submetida à  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
para obtenção do grau de  
Doutor em Engenharia Informática

Julho de 2006



# Apêndice C – Sistemas de Controlo dos Casos de Estudo

Neste Apêndice são apresentados os sistemas de controlo desenvolvidos para os casos de estudo referidos no Capítulo 5, o processo “Pêndulo Invertido”, o Campo de Colectores Solares e o processo “Três Tanques”.

## C.1 Sistema de Controlo do Processo “Pêndulo Invertido”

O projecto do sistema de controlo para o Processo “Pêndulo Invertido”, considerou a aplicação da metodologia baseada na síntese  $\mu$  (conforme secção 5.2.3.4), obtendo-se um controlador generalizado de ordem 15, em que as entradas são a referência (*ref*), as saídas do processo ( $y_1$  e  $y_2$ ) e as variáveis de estado observadas ( $x_{2o}$  e  $x_{4o}$ ), e as saídas do controlador são a acção de controlo ( $u$ ) e os resíduos ( $r_1$ ,  $r_2$  e  $r_3$ ).

A matriz de estado do controlador,  $A_{PI\mu} \in \mathcal{R}^{15 \times 15}$ , é dada por:

$$A_{PI\mu} = \begin{bmatrix} -0.0623 & 0.0121 & -0.0001 & -0.0173 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0062 & \dots \\ 2.0920 & -53.1046 & 21.6163 & 99.5318 & -0.1610 & -0.1758 & 0.0276 & \dots \\ -0.0000 & -0.8553 & -0.0116 & -0.5141 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & \dots \\ -4.0335 & 92.8240 & -22.8175 & -197.155 & 0.3099 & 0.3386 & -0.0537 & \dots \\ -1.8941 & 38.8385 & -20.2428 & -73.5941 & 0.0955 & -0.5383 & -0.0251 & \dots \\ 0.2726 & -4.3494 & 2.8330 & 9.7390 & 0.6821 & -0.0233 & 0.0042 & \dots \\ 0.0716 & -0.0053 & 0.0001 & -0.0025 & 0.0000 & -0.0000 & -1.9928 & \dots \\ 0.0000 & -0.0315 & 0.1498 & -0.0185 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & \dots \\ 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & \dots \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & \dots \\ -0.0212 & -123.367 & -0.0355 & 208.951 & -0.0023 & 0.0006 & -0.0014 & \dots \\ -1.5307 & 0.1431 & 0.0144 & 0.0600 & 0.0006 & -0.0023 & -0.1540 & \dots \\ 0.0011 & 1.4279 & -0.0182 & 0.8361 & -0.0001 & -0.0001 & 0.0000 & \dots \\ -46.4294 & -83.3915 & -496.333 & -93.566 & 3.5670 & 3.8970 & -0.6179 & \dots \\ -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & \dots \\ -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0001 & -0.0047 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 \\ 0.0840 & 0.7396 & 0.0068 & -0.0422 & 0.0003 & 0.0010 & -6.2688 & -0.0000 \\ -0.0006 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 \\ -0.1650 & -1.4243 & -0.0132 & 0.0815 & -0.0006 & -0.0020 & 12.0723 & 0.0000 \\ -0.0760 & -0.6692 & -0.0062 & -0.0003 & -0.0005 & -0.0009 & 5.6720 & 0.0000 \\ 0.0106 & 0.0937 & 0.0009 & -0.0275 & 0.0004 & 0.0001 & -0.7943 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0021 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 \\ -0.9925 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0000 & -0.0000 \\ -0.0000 & -0.1000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -670.82 \\ 0.0000 & 0.0000 & -0.1000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.0021 & -0.0004 & -0.0003 & -1.0023 & -0.0004 & -0.0000 & 0.0009 & -0.0000 \\ -0.0009 & -0.0009 & 0.0010 & 0.0003 & -5.6180 & -0.0000 & 0.0002 & 0.0000 \\ -0.0016 & 0.0004 & 0.0036 & 0.0001 & -0.0000 & -1.9963 & 0.0000 & 0.0000 \\ -1.8816 & -16.396 & -0.1516 & 1.6643 & -0.0071 & -0.0224 & -61.036 & 0.0000 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -1000.0 \end{bmatrix} \quad (C.1)$$



A matriz de entrada,  $B_{PI\mu} \in \mathcal{R}^{15 \times 5}$ , é:

$$B_{PI\mu} = \begin{bmatrix} 0.6875 & 10.8987 & 0.0011 & 0.1909 & 0.0000 \\ 0.0269 & 600.120 & 0.1887 & -1051.5 & -0.0000 \\ 0.0002 & 9.4356 & 0.1278 & 16.7046 & 0.0000 \\ 0.0005 & -1051.5 & 0.3339 & 2085.2 & 0.0000 \\ -0.0108 & -466.0377 & -0.1762 & 769.7927 & 0.0000 \\ -0.0789 & 53.2432 & 0.0442 & -101.5452 & 0.0000 \\ -0.7900 & 0.0587 & -0.0005 & 0.0276 & -0.0000 \\ 0.0000 & 0.3481 & -1.6523 & 0.2049 & -0.0000 \\ -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -7400.8 \\ 0.0000 & -0.0000 & -15.1187 & -0.0000 & 0.0000 \\ 0.1573 & 1361.0 & 0.5092 & -2305.2 & -0.0000 \\ 16.9762 & -1.4752 & 0.0296 & -0.6040 & 0.0000 \\ -0.0006 & -15.7296 & 0.2404 & -9.2090 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -11032.0 \end{bmatrix} \quad (C.2)$$

A matriz de saída,  $C_{PI\mu} \in \mathcal{R}^{4 \times 15}$ , é:

$$C_{PI\mu} = \begin{bmatrix} 0.7683 & 1.3800 & 8.2137 & 1.5484 & -0.0590 & -0.0645 & 0.0102 & \dots \\ 0.0184 & 0.0062 & -0.0282 & -0.0037 & -0.0066 & -0.0033 & 0.0000 & \dots \\ -0.0140 & -0.0002 & -0.0003 & -0.0001 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0014 & \dots \\ -0.0000 & -0.0000 & -0.0062 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & \dots \\ 0.0311 & 0.2713 & 0.0025 & -0.0275 & 0.0001 & 0.0004 & -2.2997 & 0 \\ -0.0006 & 0.0009 & 0.0008 & 0.4685 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0024 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0857 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 \\ -0.0003 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0017 & -0.0000 & -0.0000 \end{bmatrix} \quad (C.3)$$

A matriz de avanço,  $D_{PI\mu} \in \mathcal{R}^{4 \times 5}$ , é:

$$D_{PI\mu} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0000 & 0 & -0.0000 & 0 & 0.0000 \\ 0.1523 & 0 & 0.0000 & 0 & -0.0000 \\ -0.1523 & 0 & 0.0683 & 0 & -0.0000 \end{bmatrix} \quad (C.4)$$

Aplicando a técnica de optimização baseada na norma de *Hankel*, a ordem do controlador generalizado foi reduzida para 7. A matriz de estado do controlador de ordem reduzida,  $A_{PI\mu r} \in \mathcal{R}^{7 \times 7}$ , é dada por:

$$A_{PI\mu r} = \begin{bmatrix} -60.1972 & -10.2624 & -11.3293 & -0.7786 & 0.2313 & -4.1286 & -1.1760 \\ 0 & -1.4859 & 1.7397 & -0.1032 & -0.0586 & -0.8706 & -0.3051 \\ 0 & -1.8728 & -3.4909 & -0.1949 & 0.1832 & -0.3684 & -0.1898 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0215 & -0.6424 & -0.0794 & -0.0392 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6603 & -0.0156 & 0.0152 & -0.0130 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.4967 & -0.1786 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0605 \end{bmatrix} \quad (C.5)$$

A matriz de entrada,  $B_{PI\mu r} \in \mathcal{R}^{7 \times 5}$ , é:

$$B_{PI\mu r} = \begin{bmatrix} -0.0493 & -24.9493 & -3.1341 & 22.8844 & 4.5414 \\ 0.1454 & -5.0202 & -0.1008 & 13.7858 & 0.7287 \\ -0.0511 & -19.7698 & -0.4136 & -16.3089 & 1.1632 \\ -0.0142 & -4.2543 & -0.0550 & -7.5205 & 0.2253 \\ 0.1156 & 0.7793 & 0.0076 & 2.1511 & 0.0101 \\ -0.0048 & 1.9210 & 0.0991 & 28.6659 & -0.2839 \\ -0.8079 & -13.2124 & 0.0296 & -0.1274 & -0.1671 \end{bmatrix} \quad (C.6)$$

A matriz de saída,  $C_{PI\mu r} \in \mathcal{R}^{4 \times 7}$ , é:

$$C_{PI\mu r} = \begin{bmatrix} 34.8541 & 0.1520 & -18.4964 & -0.6609 & -3.1414 & 11.3328 & -1.4488 \\ -7.3737 & 19.2142 & -16.6731 & -3.6121 & 9.4521 & -21.1655 & 5.8831 \\ 0.0762 & 0.0010 & 0.0030 & -0.0003 & 0.0002 & 0.0008 & 0.0312 \\ 0.0012 & -0.0012 & 0.0041 & -0.0001 & -0.0002 & -0.0008 & -0.0003 \end{bmatrix} \quad (C.7)$$

A matriz de avanço,  $D_{PI\mu r} \in \mathcal{R}^{4 \times 5}$ , é:

$$D_{PI\mu r} = \begin{bmatrix} 0.0694 & -0.7318 & 0.6050 & 1.8499 & -3.7124 \\ -0.1768 & 0.3133 & -0.2651 & -0.7548 & 1.6870 \\ 0.1520 & 0.0050 & -0.0044 & -0.0123 & 0.0267 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0682 & -0.0001 & 0.0002 \end{bmatrix} \quad (C.8)$$

## C.2 Sistema de Controlo do Campo de Colectores Solares

O sistema de controlo desenvolvido para o Campo de Colectores Solares, após a aplicação da técnica de agrupamento *c-Means clustering*, referida na secção 5.3.3.2, é constituído por sete controladores do tipo PID, caracterizados pela seguinte equação:

$$Q_{in}(k) = Q_{in}(k-1) + g_0 e(k) + g_1 e(k-1) + g_2 e(k-2) \quad (\text{C.9})$$

Os parâmetros dos controladores considerados (Figura 5.18) foram os seguintes:

$$\mathbf{K}_1: \quad g_0 = -0.304 \quad g_1 = 0.404 \quad g_2 = -0.106$$

$$\mathbf{K}_2: \quad g_0 = -0.068 \quad g_1 = 0.100 \quad g_2 = -0.033$$

$$\mathbf{K}_3: \quad g_0 = -0.202 \quad g_1 = 0.279 \quad g_2 = -0.084$$

$$\mathbf{K}_4: \quad g_0 = -0.121 \quad g_1 = 0.165 \quad g_2 = -0.050$$

$$\mathbf{K}_5: \quad g_0 = -0.144 \quad g_1 = 0.203 \quad g_2 = -0.061$$

$$\mathbf{K}_6: \quad g_0 = -0.049 \quad g_1 = 0.073 \quad g_2 = -0.025$$

$$\mathbf{K}_7: \quad g_0 = -0.129 \quad g_1 = 0.148 \quad g_2 = -0.033.$$



A matriz de entrada,  $B_{TT\mu} \in \mathcal{R}^{11 \times 3}$ , é:

$$B_{TT\mu} = \begin{bmatrix} -0.0000 & 1.0735 & 0.3493 \\ -0.0000 & 0.3493 & 0.2105 \\ -0.0000 & -0.0013 & -0.0002 \\ -0.0000 & 0.5461 & -0.0087 \\ -0.0000 & -0.0087 & 0.5675 \\ 2756.3 & 0.0000 & 0.0000 \\ 3.3069 & -3.3069 & 0.0000 \\ 0.0000 & -6.4803 & -2.0535 \\ 0.0000 & -9.3334 & -3.3197 \\ 0.0000 & -3.0653 & -1.7675 \\ -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 \end{bmatrix} \quad (\text{C.11})$$

A matriz de saída,  $C_{TT\mu} \in \mathcal{R}^{4 \times 11}$ , é:

$$C_{TT\mu} = \begin{bmatrix} 0.4827 & 0.0501 & 1.0536 & -0.0008 & -0.0000 & -0.0065 & \dots \\ -0.0643 & -0.0062 & -0.0026 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0010 & \dots \\ -0.3117 & -0.0212 & 0.0004 & 0.0087 & 0.0000 & 0.0033 & \dots \\ -0.0733 & -0.0998 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0083 & 0.0011 & \dots \\ -0.0518 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0331 \\ 0.0075 & 0.0884 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0016 \\ 0.0255 & 0.0000 & 0.1990 & 0.0000 & 0.0054 \\ 0.0085 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1990 & 0.0018 \end{bmatrix} \quad (\text{C.12})$$

A matriz de avanço,  $D_{TT\mu} \in \mathcal{R}^{4 \times 3}$ , é:

$$D_{TT\mu} = \begin{bmatrix} -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & 0.9936 & -0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.9936 \end{bmatrix} \quad (\text{C.13})$$

Aplicando a técnica de optimização baseada na norma de *Hankel*, a ordem do controlador generalizado foi reduzida para 5. A matriz de estado do controlador de ordem reduzida,  $A_{TT\mu r} \in \mathcal{R}^{5 \times 5}$ , é dada por:

$$A_{TT\mu r} = \begin{bmatrix} -1.8776 & 1.0958 & -0.5530 & -0.0728 & 0.0289 \\ 0 & -0.5611 & 0.2351 & 0.0384 & -0.0899 \\ 0 & 0 & -0.1202 & -0.0077 & 0.0504 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0100 & 0.0012 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0579 \end{bmatrix} \quad (\text{C.14})$$

A matriz de entrada,  $B_{TT\mu r} \in \mathcal{R}^{5 \times 3}$ , é:

$$B_{TT\mu r} = \begin{bmatrix} -0.1409 & 1.4770 & 0.5153 \\ -0.1190 & -0.4422 & -0.1632 \\ -0.1050 & 0.8745 & 0.2372 \\ 0.3610 & -0.3504 & 0.0042 \\ -0.1038 & -0.1086 & -0.1735 \end{bmatrix} \quad (\text{C.15})$$

A matriz de saída,  $C_{TT\mu r} \in \mathcal{R}^{4 \times 5}$ , é:

$$C_{TT\mu r} = \begin{bmatrix} 0.0980 & 0.3820 & 0.7748 & -0.4716 & -0.2533 \\ -0.2935 & 0.4711 & -0.1549 & -0.0065 & 0.0295 \\ -1.1132 & 0.7396 & -0.3706 & -0.0655 & 0.0161 \\ -0.3589 & 0.2970 & -0.0875 & 0.0235 & 0.1534 \end{bmatrix} \quad (\text{C.16})$$

A matriz de avanço,  $D_{TT\mu r} \in \mathcal{R}^{4 \times 3}$ , é:

$$D_{TT\mu r} = \begin{bmatrix} -0.1004 & 0.0003 & -0.0032 \\ 0.0170 & -0.0013 & 0.0027 \\ 0.0469 & 0.9937 & 0.0008 \\ 0.0130 & 0.0008 & 0.9926 \end{bmatrix} \quad (\text{C.17})$$