Carlos Alberto Guedes Carvalho

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Projecto e Implementação de Supervisor Inteligente em Controladores Lógicos Programáveis

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Doutor Luis Filipe Figueira Brito Palma, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Luís Filipe dos Santos Gomes
Arguente: Doutor João Almeida das Rosas
Vogal: Doutor Luís Filipe Figueira de Brito Palma

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2013

Carlos Alberto Guedes Carvalho

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Projecto e Implementação de Supervisor Inteligente em Controladores Lógicos Programáveis

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Doutor Luis Filipe Figueira Brito Palma, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Luís Filipe dos Santos Gomes
Arguente: Doutor João Almeida das Rosas
Vogal: Doutor Luís Filipe Figueira de Brito Palma

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2013

Copyright

Agradecimentos

Esta Tese é submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. O trabalho de investigação que resultou nesta Dissertação teve a supervisão do Professor Doutor Luís Filipe Figueira de Brito Palma, Professor do Departamento de Engenharia Electrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, e foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Electrotécnia da Universidade Nova de Lisboa (DEE).

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

Ao Professor Doutor Luís Brito Palma, agradeço o apoio e compreensão que me dispensou, a criação de condições para o desenvolvimento deste trabalho e o constante incentivo e entusiasmo ao longo desta jornada.

Ao colega de curso Carlos Calmeiro, pela amizade, companheirismo e partilha de conhecimentos, não só durante a elaboração deste projecto, como também ao longo de todos estes anos que nos conhecemos.

Aos meus amigos e aos meus colegas de curso, em particular aos colegas Bruno Valente, Fábio Alves, Fábio Júlio, João Santos, Luís Lopes, Luís Miranda, Micael Simões, Miguel Marques, Pedro Gomes, Ricardo Mendonça e Tiago Xavier, o meu agradecimento pela sua amizade e companheirismo e por ajudarem a preencher a minha vida com bons momentos.

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

Resumo

Esta Tese enquadra-se na área de controlo e automação e tem como principal objectivo o desenvolvimento de um sistema de supervisão e controlo de processos dinâmicos com tolerância a falhas. É apresentada uma abordagem para a sua implementação em Controladores Lógicos Programáveis (PLC). Os processos considerados apresentam características não lineares e são representativos de sistemas de maior dimensão e complexidade, existentes, por exemplo, em meios industriais, em aeronáutica ou em equipamentos médicos.

O sistema de supervisão proposto inclui também um sistema de detecção e diagnóstico de falhas (FDD), e enquadra-se na vertente dos métodos activos de controlo tolerante a falhas. O sistema de FDD e o supervisor devem ser capazes de, em conjunto, detectar, identificar e, sempre que possível, accionar mecanismos de correcção/reconfiguração do sistema, quando ocorrem falhas no processo ou nos seus componentes. 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.

Neste trabalho é considerado o processo laboratorial existente no Laboratório de Automação do DEE (Processo "Dois Tanques"). A implementação destas metodologias no processo será efectuada com recurso a Controladores Lógicos Programáveis do modelo M340 da Schneider Electric e deverá permitir a comunicação com controladores remotos implementados noutros PLC's similares.

A implementação proposta para os módulos de supervisão e FDD faz uso de linguagens de programação descritas na norma 61311-3 da IEC (*International Electrotechnical Commission*) – texto estruturado, diagrama em escada e diagrama de blocos funcionais.

Palavras-chave: controlo supervisionado tolerante a falhas (FTSC), controladores lógicos programáveis (PLC), detecção e diagnóstico de falhas (FDD), acomodação de falhas.

Abstract

This thesis falls within the control and automation areas, and has as its main objective the development of a supervision system of dynamic processes with fault tolerant control. It is presented an approach to its implementation on programmable logic controllers (PLC). The considered processes show nonlinear characteristics and are representative of greater size and complexity systems, existing, for example, in industrial environment, aeronautics or medical equipment.

The proposed supervisor also includes a detection and fault diagnosis (FDD) system, and fits as part of active methods of fault-tolerant control. The FDD system and the supervisor must be capable of jointly detecting, identifying and, when possible, execute correction/ reconfiguration mechanisms when failures occur in the process or its components. The approach essentially considers a mechanism based on fuzzy logic to manage the information received from the process, the diagnostic module and from human supervisor.

In this work we consider a process existing in Automation Laboratory of Electrotecnic Engineering Department ("Two Tanks" Benchmark). The process implementation of these methodologies will be using Schneider Electric M340 Programmable Logic Controllers and will allow communication with remote controllers implemented in other similar PLCs.

The proposed implementation for supervisor and FDD modules is based on the use of programming languages described in the IEC 61311-3 standard (International Electrotechnical Commission) - structured text, ladder diagram and function block diagram.

Keywords: supervised fault tolerant control (FTSC), programmable logic controllers (PLC), fault detection and diagnostics (FDD), accommodation faults.

Índice Geral

Índice de Figuras

Capítulo 2:

Capítulo 3:

Capítulo 4:

Anexo A:

Anexo B:

Anexo C:

Índice de Tabelas

Capítulo 4:

Siglas e Símbolos

ADC - (Analog-Digital Converter) - Conversor Analógico-Digital

ARX - (Autoregressive with External Input) - Auto-regressivo com entrada exógena

CS - (Controller Switching method) - Método de Comutação de Controladores

DAC - (Digital-Analog Converter) - Conversor Digital-Analógico

FBD - (Function Block Diagram) - Diagrama de Blocos Funcionais

FDD - (Fault Detection and Diagnosis) - Detecção e Diagnóstico de Falhas

FDI - (Fault Detection and Isolation) - Detecção e Isolamento de Falhas

FTC - (Fault Tolerant Control) - Controlo Tolerante a Falhas

FTCS - (Fault Tolerant Control System) - Sistema de Controlo Tolerante a Falhas

FTSC - (Fault-Tolerant Supervisory Control) - Controlo Supervisionado Tolerante a Falhas

IL - (Instruction List) - Lista de Instruções

LD - (Ladder Diagram) - Diagrama de Escada

MM - (Multiple Model method) - Método de Múltiplos Modelos

MPC - (Model Predictive Control) - Controlo Preditivo por Modelos

MRAC - (Model-Reference Adaptive Control) - Controlo Adaptativo com Modelo de Referência

PEQ - (Parity Equations) - Equações de Paridade

PLC - (Programmable Logic Controller) - Controlador Lógico Programável

SFC - (Sequential Function Chart) - Diagrama Sequencial de Funções

SG - (Static Gain) - Ganho Estático

SISO - (Single-Input Single-Output) - Entrada Única e Saída Única

ST - (Structured Text) - Texto Estruturado

e - erro;

Δe - variação do erro;

f_a - Falhas nos actuadores;

f_c - Falhas no processo;

f_s: Falhas nos sensores;

h_1: Nível do tanque 1;

h_2: Nível do tanque 2;

h_T - altura do canal que liga os tanques 1 e 2;

h_{max} - altura máxima da água;

k - coeficiente de escoamento adimensional

mv - Válvula manual;

n - Ruído sensor;

p - Perturbaçoes;

r - resíduos;

Q_1 - Caudal à entrada do tanque 1;

Q_{12} - Caudal entre os tanques 1 e 2;

Q_{20} - Caudal à saída do tanque 2;

S - Área da secção transversal do tanque;

sv - Servo-válvula;

T_0 - Reservatório;

T_1 - Tanque 1;

T_2 - Tanque 2;

T_a: Tempo de amostragem;

θ - parâmetros do modelo;

$\hat{\theta}$ - parâmetros estimados do modelo;

u - acção de controlo;

y - saída do processo;

Z^n - conjunto de resultados

1. Introdução

A tolerância a falhas é um factor cada vez mais determinante no controlo de processos dinâmicos. Neste trabalho é dada uma contribuição para a formulação estruturada de sistemas de supervisão no controlo tolerante a falhas, englobando o projecto dos módulos de detecção e diagnóstico de falhas e do módulo de supervisão.

Neste primeiro capítulo, é feito o enquadramento do trabalho que resultou nesta Tese e são apresentados os seus objectivos principais. Na secção 1.1 é apresentada a motivação para o tema deste trabalho e na secção 1.2 são referidos os objectivos e as contribuições do trabalho desenvolvido. Na secção 1.3 são descritos os aspectos mais relevantes das metodologias consideradas e da arquitectura proposta. Por último, na secção 1.4, é apresentada a organização da Tese.

Com o aumento da complexidade dos sistemas de controlo e da sofisticação dos seus algoritmos, as questões de eficiência, fiabilidade, segurança de operação e protecção ambiental adquirem um papel fundamental no projecto destes sistemas.

Embora estas questões tenham grande relevância em sistemas de segurança crítica (v.g. reactores nucleares e aviões), elas surgem também em sistemas de controlo de comboios, automóveis, linhas de produção e, cada vez mais, em sistemas de menor complexidade.

Neste trabalho considera-se o projecto de um sistema de controlo tolerante a falhas (FTCS) para sistemas dinâmicos onde se pretende que o comportamento do processo perante possíveis falhas seja melhorado, bem como a sua disponibilidade e confiabilidade. O desenvolvimento de sistemas de detecção e diagnóstico de falhas e de supervisão para estes processos contribui para o aumento da confiabilidade e da disponibilidade do sistema, garantindo a melhoria do seu desempenho.

Um FTCS é um sistema de controlo em malha fechada, distinguindo-se dos sistemas de controlo convencionais pela capacidade de tolerar falhas e avarias em componentes do sistema e em sensores e actuadores, permitindo manter a estabilidade e o melhor desempenho possível do sistema na presença dessas mesmas falhas. O sistema é constituído essencialmente por três partes: o módulo de controlo, composto por um ou mais controladores, o módulo de diagnóstico, que é responsável pela detecção, isolamento e identificação das falhas, e o módulo de supervisão que, com a informação das características das falhas gerada no módulo de diagnóstico, efectua a gestão do sistema.

Não sendo o projecto do módulo de controlo um dos objectivos desta Tese, é dada uma maior ênfase ao módulo de diagnóstico, onde são estudados alguns métodos de detecção de falhas bem como o isolamento e identificação das mesmas. É ainda desenvolvido o módulo de supervisão, que é responsável pela identificação do modo de funcionamento do sistema, pela apresentação de toda a informação relevante para o supervisor humano, através de uma interface homem-máquina, e pela tomada de decisões em resposta às situações de falha, executando acções correctivas, procurando aumentar a fiabilidade, eficiência e a longevidade do sistema.

1.1. Motivação

A existência de falhas nos sistemas pode resultar em elevados prejuízos económicos, um impacto ambiental significativo ou mesmo em perdas humanas. 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.

Os actuais padrões de eficiência, desempenho e segurança exigidos nos sistemas de controlo para sistemas dinâmicos, combinados com o aumento da complexidade dos processos envolvidos, requerem um nível elevado de automação, onde quase todas as tarefas são executadas por PLCs e/ou 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. Contudo, o progressivo aumento da monitorização dos processos implica a utilização de instrumentação redundante (sensores e actuadores), o que, apesar dos benefícios daí resultantes, significa que os sistemas passam a apresentar uma maior vulnerabilidade a falhas na instrumentação, podendo a disponibilidade do sistema ser afectada.

Tendo em conta que as tarefas de detecção e isolamento das falhas são, em muitos casos, realizadas por supervisores humanos, será desejável que os sistemas sejam o mais autónomos possível, sem nunca se sobreporem aos supervisores humanos nas decisões finais. Esta maior autonomia dos sistemas permitirá uma maior protecção dos supervisores humanos e do ambiente envolvente, bem como uma maior rapidez e eficácia na resposta às falhas do sistema.

Quando olhamos para o passado recente, encontramos vários exemplos em que falhas, por vezes simples, resultam em perdas humanas e económicas dramáticas. Em seguida são referidos alguns desses casos:

i) Em Fevereiro de 1996, durante a descolagem do voo 301 da Birgenair, o capitão Armed Erden, um dos pilotos mais experientes, nota que o seu indicador de velocidade (ASI) não está a funcionar correctamente, mas opta por não abortar a descolagem. O ASI do co-piloto está a funcionar perfeitamente. Enquanto o avião sobe aos 4.700 pés (1.400 m), o indicador de velocidade do capitão lê 350 nós (velocidade máxima que o avião aguenta para esta altitude). O piloto automático, que recebe informação da velocidade a partir do mesmo equipamento que o ASI do capitão, reduz a velocidade do avião. Ainda assim, o avião dá várias advertências contraditórias de velocidade elevada e o piloto automático é desactivado. Os pilotos, em resposta aos alarmes de velocidade elevada dados pelo aparelho, reduzem ainda mais a velocidade, e novos alarmes são disparados, mas agora de velocidade perigosamente baixa. O capitão tenta aumentar novamente a velocidade, mas o avião perde sustentação e acaba por cair no Oceano Atlântico. Todos os 13 tripulantes e 176 passageiros morreram.

ii) Em Maio de 2009, o voo 447 da Air France descolou do Rio de Janeiro com destino a Paris. O avião, um Airbus A330-200, levava 12 tripulantes e 216 passageiros. O aparelho atravessou uma zona de tempestade com fortes turbulências e caiu no meio do Oceano Atlântico, matando todos a bordo. As investigações realizadas apontam para uma falha nos sensores de velocidade do Airbus A330.

iii) Em Junho de 1996, o foguetão Ariane 5 explode poucos segundos após ter sido lançado, devido a uma excepção no software, a qual originou a transmissão de dados errados sobre a posição e a trajectória do foguetão ao controlador. Apesar de não ter resultado em perdas humanas, o acidente pôs termo a um programa com um grande investimento financeiro.

Nos exemplos referidos, as consequências das falhas poderiam ter sido reduzidas ou mesmo evitadas com a introdução de sistemas de detecção e diagnóstico de falhas (FDD) e sistemas de supervisão. A utilização destes sistemas traduz-se numa maior disponibilidade dos sistemas perante a existência de falhas na instrumentação e nos componentes do sistema.

Para o projecto de 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

Pretende-se com este trabalho desenvolver um sistema de detecção e diagnóstico de falhas e um sistema de supervisão que promova a acomodação de falhas gerando acções correctivas e identificando em cada momento o modo de funcionamento do processo.

Neste trabalho pretende-se ainda aplicar algumas das metodologias aqui propostas a um processo com características dinâmicas semelhantes às dos processos industriais. Para atingir este objectivo é considerado o processo laboratorial existente no Laboratório de Automação do DEE (Processo "Dois Tanques" - FBK 38-100). A implementação destas metodologias no processo será efectuada com recurso a Controladores Lógicos Programáveis (PLC). O PLC a utilizar será o modelo M340 da Schneider Electric e deverá ter a capacidade de comunicar com controladores remotos implementados noutros PLC's similares.

Esta tese foi desenvolvida como complemento a um trabalho desenvolvido em paralelo, servindo esta parceria para melhor contextualizar ambos os trabalhos, bem como para dar uma melhor contribuição para o departamento de Automação. A tese referida tem como título "Sistema de Controlo Tolerante a Falhas baseado em Comutação de Controladores – Implementação em Autómatos Programáveis".

Considerando estes objectivos e o trabalho desenvolvido, são indicadas as principais contribuições desta Tese:

i) Considerando o objectivo de desenvolver um sistema tolerante a falhas são propostas no capítulo 3 as metodologias e uma arquitectura 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 dos sistemas de diagnóstico e de supervisão no sistema de controlo pretende-se detectar e isolar eventuais falhas e, a partir do diagnóstico, caracterizar o modo de funcionamento do processo, bem como fornecer a informação essencial ao supervisor humano e executar acções correctivas que permitam, caso existam falhas, responder da melhor forma à sua presença. 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.

ii) O projecto e a implementação de sistemas de supervisão no processo laboratorial "Dois Tanques" vem mostrar a aplicabilidade das metodologias propostas em sistemas reais e a sua possível extensão a outros processos de maior complexidade e dimensão.

1.3. O Sistema de Supervisão Proposto

Como foi referido na secção anterior, pretende-se, com este trabalho, desenvolver metodologias para o projecto de sistemas de supervisão em controlo tolerante a falhas, 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.

No módulo de detecção e diagnóstico de falhas (FDD) são utilizadas diferentes abordagens para cada uma das etapas evolvidas. A abordagem utilizada na detecção de falhas, baseia-se essencialmente na identificação em linha de modelos ARX para posterior análise dos seus parâmetros, como por exemplo, o ganho estático. É também considerado uma outra abordagem que consiste na análise dos resíduos obtidos através da utilização de equações de paridade (PEQ), e ainda resíduos obtidos a partir de observadores baseados em filtros de Kalman. Estas abordagens serão descritas mais à frente nos capítulos 2 e 3.

A etapa de isolamento de falhas é onde se procede ao processamento dos sinais com o objectivo de obter informação sobre a localização das falhas, a sua dimensão e se existe mais do que uma falha a ocorrer em simultâneo. Evidentemente, a complexidade do sinal processado depende fortemente do número de falhas que ocorram, da distribuição das possíveis falhas pelo processo e das características e informação disponíveis de cada falha.

O módulo de diagnóstico inclui a tarefa de identificação das falhas que é, possivelmente, a etapa mais importante de todo o sistema de detecção e diagnóstico de falhas. Na verdade, uma identificação bem sucedida significa implicitamente que a detecção e isolamento da falha foram também bem sucedidos. A identificação das falhas permite aferir não só a dimensão da falha, mas também se esta é recuperável ou não, recorrendo para isso a informação sobre cada falha, a qual requer um conhecimento prévio do comportamento do sistema.

O supervisor é constituído por um mecanismo baseado em lógica difusa que utiliza a informação recolhida do módulo de diagnóstico e também na identificação do modo de funcionamento do sistema, pela qual este módulo é também responsável, para decidir que acções devem ser tomadas para garantir a estabilidade e o bom desempenho de todo o sistema. Em caso de falha, o supervisor gera acções correctivas para acomodação das falhas, baseadas, essencialmente, em sensores e actuadores virtuais e/ou na comutação entre controladores.

1.4. Organização da Tese

Este documento é composto por cinco capítulos, incluindo este capítulo de Introdução, e está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2 – Estado da Arte

Neste capítulo é feito um levantamentodo estado da arte no que diz respeito à supervisão e controlo com tolerância a falhas. É feita uma descrição dos sistemas de supervisão e do seu papel fundamental na tolerância a falhas em sistemas de controlo. São ainda apresentados alguns casos de estudo nesta área.

É realizado um levantamento do estado da arte em programação de Controladores Lógicos Programáveis (PLC). É descrita a estrutura base de um PLC, bem como as linguagens de programação segundo a norma IEC-61131, parte I e parte III, respectivamente. Por fim, são apresentados alguns casos de estudo nesta área.

Procede-se ao enquadramento da abordagem proposta na Tese na área de supervisão e controlo tolerante a falhas e da sua implementação em PLCs.

Capítulo 3 – Sistema de Supervisão

Neste capítulo é proposta uma arquitectura para o sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas. É feita uma descrição dessa arquitectura e dos três níveis que a compõem: nível de Processo, nível de Execução e nível de Supervisão.

São apresentadas as metodologias propostas para a detecção, isolamento e diagnóstico das falhas. É também descrito o sistema de reconfiguração, que tem em conta sensores e actuadores virtuais, e que garante tolerância a falhas sem ser necessário alterar o controlador.

É feita uma análise da abordagem proposta e são formuladas algumas conclusões.

Capítulo 4 – Casos de Estudo

Neste capítulo são aplicadas as metodologias propostas para o projecto do sistema de supervisão ao processo “Dois Tanques” que apresenta componentes redundantes, possibilitando a implementação das metodologias de acomodação de falhas e de reconfiguração do processo. Este sistema é representativo de diversos processos onde se verifique, nomeadamente, o armazenamento e transporte de líquidos.

Capítulo 5 – Conclusão

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

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 são retiradas algumas conclusões. No final da Tese inclui-se o Anexo A, com os esquemas eléctricos do hardware desenvolvido, necessário ao projecto, o Anexo B com informação sobre a modelação do sistema e calibrações dos actuadores e sensores, e o Anexo C, onde são apresentadas as melhorias feitas na instalação, incluindo a montagem dos Autómatos Programáveis (PLCs).

2. Estado da Arte

No controlo de processos dinâmicos, a crescente complexidade dos processos obriga a ter-se em consideração sistemas de supervisão que promovam fiabilidade e autonomia a esses processos.

Neste capítulo será feito um levantamento dos trabalhos existentes mais significativos para a área de supervisão e controlo tolerante a falhas e são apresentadas algumas das metodologias e arquitecturas mais estudadas nessas áreas. 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 neste trabalho.

Na primeira secção são referenciados alguns dos métodos passivos e activos em controlo tolerante a falhas, sendo dado maior relevo aos métodos activos, uma vez que estes implicam a existência de sistemas de detecção e diagnóstico de falhas, que é um dos temas principais desta Tese.

Na secção 2.2 são referidos os métodos de detecção e diagnóstico de falhas, abordando os métodos baseados em modelos do sistema e métodos não baseados em modelos do sistema.

Na secção 2.3 é feita uma introdução aos Controladores Lógicos Programáveis (PLC), referindo as características da sua arquitectura e do seu funcionamento. É apresentada a norma 61131 do IEC, com especial foco na parte III, onde são descritas as cinco linguagens de programação existentes para PLC's (Diagrama em Escada, Lista de Instruções, Grafo Sequencial de Funções, Texto Estruturado e Diagrama Funcional de Blocos).

Na última secção deste capítulo é realizada uma análise comparativa dos métodos apresentados e é feito o enquadramento da abordagem proposta neste trabalho.

2.1. Controlo Tolerante a Falhas (FTC)

Um dos grandes desafios que os investigadores na área do controlo têm vindo a enfrentar, ao longo dos anos, é precisamente o controlo tolerante a falhas. Têm sido muitas as arquitecturas e metodologias desenvolvidas neste campo com o objectivo de garantir robustez e um bom desempenho do sistema na presença de falhas (*faults*). As capacidades de detectar e diagnosticar qualquer tipo de falha que ocorra numa instalação, bem como a de acomodar essa mesma falha, recorrendo a métodos passivos ou activos, são cada vez mais determinantes para o sucesso dos sistemas de supervisão e controlo, razão pela qual estes já se tornaram praticamente indispensáveis na indústria moderna, principalmente nos sistemas mais críticos.

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. (2000a), Aström et al. (2001), Schroder (2002), Blanke et al. (2003), Simani et al. (2003), Hajiyev and Caliskan (2003) e Isermann (2006).

Um sistema de controlo procura garantir que o processo a ser controlado funciona correctamente, sempre que os seus serviços sejam solicitados, e de acordo com os objectivos definidos. Contudo, o processo e o próprio sistema de controlo estão sujeitos a falhas, o que pode, muitas vezes, resultar em reacções indesejáveis, em avarias (*failures*) ou mesmo conduzir à paragem do processo, podendo provocar estragos em componentes do processo ou mesmo pôr em risco a segurança dos operadores humanos.

Em Zhang and Jiang (2003) e Patton (1997), é sugerida a divisão do FTC em dois grandes grupos (ver figura 2.1): controlo passivo tolerante a falhas (PFTC) e controlo activo tolerante a falhas (AFTC). Nos sistemas de controlo passivo tolerante a falhas, o controlador é desenhado para ser robusto contra falhas e incertezas, não necessitando de sistemas de FDD. Por outro lado, os sistemas de controlo activo tolerante a falhas respondem de forma activa a falhas no processo, através da reconfiguração dos parâmetros de controlo, por forma a garantir estabilidade e o bom desempenho do sistema na presença dessas falhas.

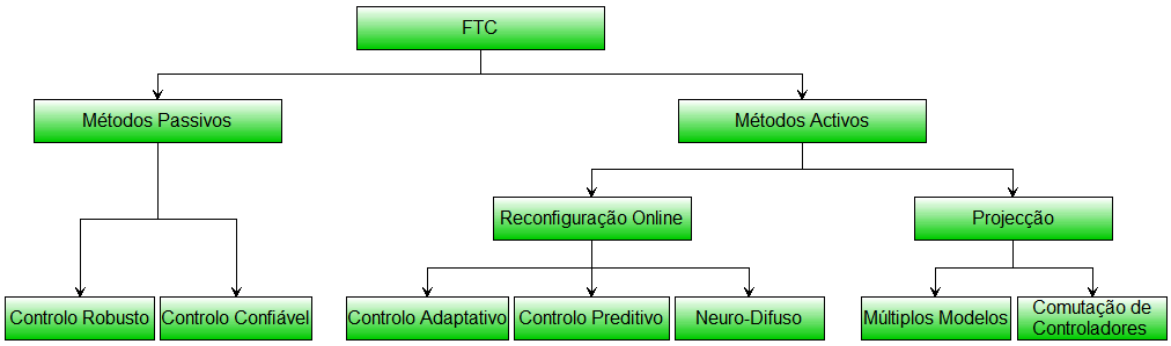

Figura 2.1: Classificação do Controlo Tolerante a Falhas.

2.1.1. Métodos Passivos

Os métodos passivos em controlo tolerante a falhas procuram obter insensibilidade a determinadas falhas através da robustez do sistema em relação a essas falhas. Na presença de uma falha, o controlador deve ser capaz de manter a estabilidade do sistema, embora com alguma degradação do desempenho e da disponibilidade.

Devido às suas características não-adaptativas, a aplicabilidade desta abordagem está limitada a condições específicas, sendo apenas eficaz em falhas que não afectem de forma significativa o comportamento do sistema. Contudo, não necessitando de módulos de detecção e diagnóstico de falhas nem de módulos de reconfiguração ou adaptação do controlador, assentam numa estrutura de controlo única e inalterável, sendo uma abordagem atractiva do ponto de vista da implementação prática pela sua simplicidade.

Controlo Confiável

O projecto de controladores passivos confiáveis (*reliable control*) tem como principal objectivo garantir a fiabilidade do sistema em malha fechada, assegurando a estabilidade e o desempenho pretendido na presença de falhas previstas. O objectivo passa pela procura de um controlador que optimize o denominado desempenho com a pior-falha (*worst-fault performance*) para todas as falhas previstas. Esta abordagem considera que uma avaria total só pode ocorrer num determinado subconjunto de sensores ou actuadores do sistema. Como referência para métodos de projecto de controladores confiáveis, destacam-se os artigos de Suyama and Zhang (1997), Chang (2000), Liang et al. (2000), , Liao et al. (2002), Niemann and Stoustrup (2002) e Suyama (2002).

Controlo Robusto

O projecto de controladores robustos baseia-se na obtenção de um controlador que satisfaça as especificações de projecto em funcionamento nominal e que garanta um desempenho satisfatório na presença de falhas. Uma das metodologias mais populares em controlo robusto na década de 1980 foi o controlo H_∞.

A maioria das abordagens de controlo robusto não exigem qualquer informação acerca das falhas e, portanto, funcionam tanto no estado nominal como na presença de falhas. A capacidade de lidar com falhas depende do controlador conseguir minimizar o efeito da incerteza ou as perturbações no sistema (Magni, 1997).

Como referência para métodos de projecto de controladores robustos, destacam-se Chen and Patton (2001), Stoustrup and Niemann (2001), Niemann and Stoustrup (2003), Fliess et al. (2005).

2.1.2. Métodos Activos

Os métodos activos encontram-se com mais frequência na literatura do que os passivos, devido ao facto de apresentarem um melhor desempenho e uma 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.

Estes metodos, como já referido anteriormente, baseiam-se na reconfiguração ou na modificação dos parâmetros de controlo como forma de resposta à ocorrência de falhas. Ao contrário das abordagens passivas, os métodos activos englobam a funcionalidade de detecção e diagnóstico de falhas, por forma a identificar o tipo de falha e o seu grau de severidade, uma vez que, para cada classe de falhas, podem haver diferentes soluções. A arquitectura de um sistema activo de controlo tolerante a falhas pode ser genericamente representada pelo esquema apresentado na figura 2.2.

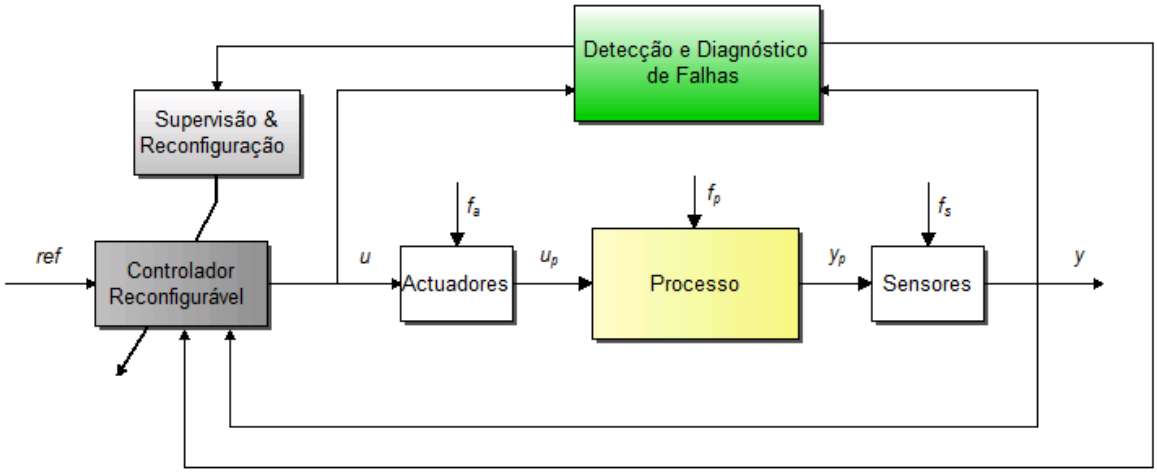

Figura 2.2: Diagrama genérico de um sistema AFTC.

Múltiplos Modelos

O método de múltiplos modelos (MM) é uma abordagem activa em FTC e considera a existência de um conjunto finito de modelos lineares M_i, i =1,...,n_M que possibilitam a descrição do sistema nos diferentes modos de funcionamento, nominal ou com falhas. Para cada um dos modelos locais, M_i, é projectado, offline, um controlador K_i. Uma das desvantagens desta abordagem é a de que o conjunto de modelos deve obrigatoriamente incluir todos os modos de falha possíveis. Isto significa que na ocorrência de uma falha imprevista ou de múltiplas falhas em simultâneo, o sistema não está preparado para lidar com elas, e sua resposta pode levar à instabilidade de todo o processo.

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

$$\mathbf{u(t) = \sum_{i=1}^{n} w_i u_i(t), \qquad \sum_{i=1}^{n} w_i = 1} \tag{2.1}$$

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

A acção de controlo a aplicar ao sistema resulta de uma combinação ponderada (Blending) das várias acções de controlo geradas pelos diferentes controladores (Zhang and Jiang, 2001; Demetriou, 2001; Theilliol et al., 2003; Yen and Ho, 2003).

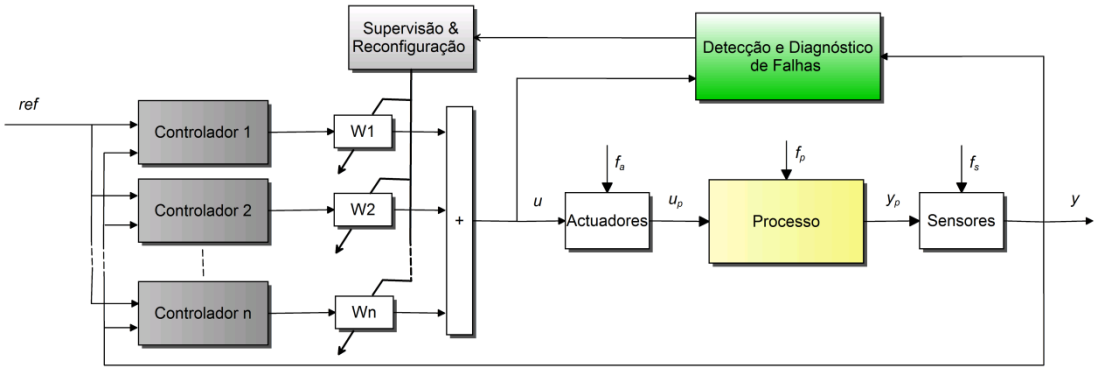

Figura 2.3: Arquitectura de um sistema FDD utilizando múltiplos modelos.

Comutação de Controladores

O método de comutação de controladores (CSM) apresenta algumas características semelhantes ao método de múltiplos modelos. É considerado um conjunto de modelos que representam o sistema para as situações de falha previstas. Para cada modelo é projectado um controlador que será seleccionado quando o modelo que lhe está associado for o que melhor se adeque ao actual comportamento dinâmico do sistema. A diferença deste método e o 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.

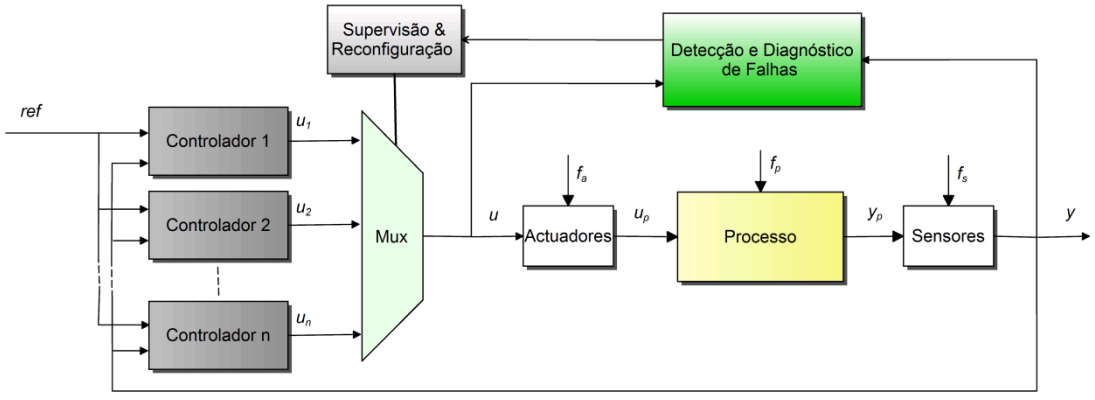

Figura 2.4: Arquitectura de um sistema FDD com comutação de modelos.

Partindo da equação 2.1, e assumido que em cada instante de tempo, só um modelo, Mi , corresponde ao modo de funcionamento do sistema, obtendo-se, assim, uma ponderação $\mathbf{w_i(t)}$ com um valor igual a 1, apresentando as restantes ponderações $\mathbf{w_j(t)}$, j $\neq$ i o valor 0 (multiplexagem).

Esta abordagem depende fortemente da robustez do módulo de FDD na identificação do modelo correcto e respectivo controlador a ser activado. Se for identificada a falha errada, o controlador errado será activado e o sistema pode ser levado até à instabilidade.

Uma abordagem usual, na selecção do controlador mais adequado, é através da análise de um sinal residual, resultante da comparação entre a saída do sistema e as saídas dos diversos modelos (Musgrave et al., 1997; Lemos et al., 1999). Encontram-se outras abordagens na literatura que se baseiam na comutação dos controladores, das quais de destacam Chang et al. (2001) e Médar et al. (2002). O problema de reduzir os transitórios durante a fase de comutação dos controladores também foi recentemente considerado em Kovácsházy et al. (2001) e em Rato (2002).

Controlo Adaptativo

Existem duas abordagens possíveis em controlo adaptativo: adaptação directa e indirecta (Åström and Wittenmark, 1989; Dumont and Huzmezan, 2002; Jones, 2005). Na adaptação indirecta, são estimados os parâmetros do sistema e em seguida é utilizada esta informação na implementação do controlador. Na adaptação directa, os parâmetros do controlador são obtidos directamente sem estimação dos parâmetros do sistema. Algumas das metodologias mais populares são o Controlo Adaptativo com Modelo de Referência (MRAC) e o Regulador Auto-Ajustado (STR) (Slotine et al., 1991).

Os métodos de controlo adaptativo apresentam características adequadas ao AFTC, devido à sua capacidade de adaptação a alterações dos parâmetros do sistema, não necessitando, em muitos dos casos, do mecanismo de reconfiguração e do sistema de FDD (ver figura 2.5). Isto verifica-se essencialmente para as falhas nos componentes e nos actuadores. Contudo, no caso das falhas nos sensores, se o método se basear na realimentação das saídas, as medidas efectuadas com falha vão seguir o sinal de referência podendo conduzir o sistema à instabilidade. Por exemplo, se a falha no sensor fôr 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.

Outros métodos adaptativos para FTC podem ser encontrados, Boskovic et al. (2000b), Kim et al. (2001), Dionísio et al. (2003), Jiang et al. (2003), Kececi et al. (2003) e Fekri et al. (2004).

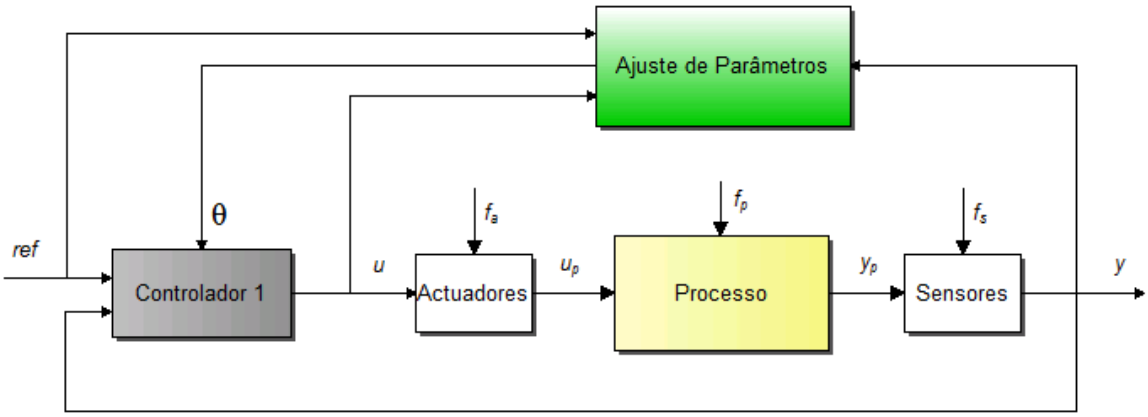

Figura 2.5: Arquitectura de um sistema de controlo adaptativo.

Controlo Preditivo

Os métodos de Controlo Preditivo (MPC) utilizam modelos explícitos do processo para prever a saída num determinado horizonte finito. São calculadas as ações de controlo para todo o horizonte a partir da minimização de uma determinada função objetivo. Este horizonte é deslizante, isto é, em cada período de amostragem o horizonte é deslocado uma amostra. De acordo com Ramos (2003), a finalidade da função objetivo (J) é minimizar o erro entre a previsão da saída ($\hat{y}$) e a referência desejada (w) penalizando o esforço de controlo (Δu). A equação mais comum da função objetivo é a seguinte:

$$\boldsymbol{J = \sum_{k=N_1}^{N_2} \delta[\hat{y}(j+k)|j - w(j+k)]^2 + \sum_{k=1}^{N_u} \lambda[\Delta u(j+k-1)]^2} \qquad (2.2)$$

onde N_1 e N_2 são os horizontes de predição, mínimo e máximo, onde se deseja que a saída siga a referência, N_u é o horizonte de controlo e δ e λ são ponderações do erro e do esforço de controlo, respectivamente.

As diferenças entre os diversos métodos de controlo preditivo existentes devem-se basicamente à forma de escolher os modelos para o processo, ao tipo de função objetivo e ao procedimento para manipular as restrições e o cálculo de controlo.

Este método é muito popular em ambientes industriais por assentar em princípios de controlo relativamente simples, facilitando assim a sua implementação. No entanto, a execução do processo de optimização em cada passo temporal é complexa e torna a utilização deste método adequada apenas a processos com dinâmicas temporais lentas, como por exemplo processos químicos ou de energia solar (Gil, 2003).

Como referências para os sistemas de FTC baseados em MPC refiram-se os trabalhos de Huzmezan and Maciejowski (1999), Kerrigan and Maciejowski (1999) e Maciejowski and Jones (2003).

Neuro-Difusos

Os controladores neuro-difusos (NDC) podem ser analisados como sistemas de inferência difusa, implementados sob a arquitectura das redes neuronais. O objectivo fundamental é obter as vantagens da lógica difusa no que respeita ao processo de raciocínio (reasoning), e com a capacidade de aprendizagem (learning) das redes neuronais.

Na área do controlo adaptativo têm sido propostas metodologias de FTC que utilizam 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 (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 (Chen and Narendra, 2001; Chen and Lee, 2002; Diao and Passino, 2001; 2002; Zhang et al., 2002; Fray et al., 2003).

2.2. Detecção e Diagnóstico de Falhas (FDD)

Um sistema de FDD compreende detecção de falhas ("algo está errado"), isolamento de falhas ("localização espaço-temporal da falha") e identificação de falhas ("grau de severidade e a sua natureza"), como é mostrado na figura 2.6. O principal objectivo da FDD é identificar falhas incipientes o mais rapidamente possível, de modo a evitar eventuais avarias. O grande desafio, neste contexto, reside no compromisso que existe entre a não-detecção de uma falha e a obtenção de falsos alarmes. Muitas vezes, o diagnóstico de falhas é abordado através da utilização de redundância de hardware, onde vários sensores executam as mesmas leituras e atuadores executam as mesmas funções. As principais desvantagens desta abordagem, no entanto, são maiores custos e menor autonomia, devido ao peso adicional, volume e potência necessária (Patton, 1991).

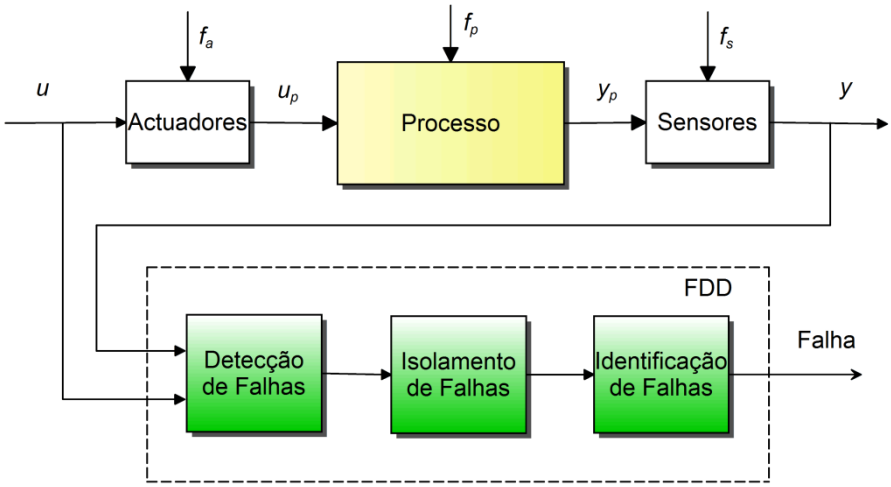

Figura 2.6: Diagrama genérico da arquitectura de um sistema FDD.

São considerandos dois tipos de abordagem em sistemas de detecção e diagnóstico de falhas. O primeiro é a redundância analítica, que explora as relações entre as variáveis medidas ou estimadas, a fim de detectar possíveis desvios no comportamento do sistema. Este conjunto de métodos é normalmente chamado de FDD baseado em modelos, onde os modelos devem ser entendidos como modelos dinâmicos dos processos. O comportamento do sistema pode ser modelado através de um conjunto de equações diferenciais, geralmente em forma de espaço de estados. O segundo grupo de métodos é muitas vezes referido como "*model-free* " (métodos não baseados em modelos), embora se faça uso da redundância e correlação dos dados de uma forma oculta. São analisadas as medições adquiridas em tempo real, ou disponíveis numa base de dados previamente construída, utilizando um modelo do comportamento de sinais de entrada e saída (Palma, 2007; Marzat et al., 2009).

2.2.1. FDD Baseado em Modelos

O estudo sobre diagnóstico de falhas baseado em modelos começou no início de 1970. Fortemente estimulado pelas então recentes teorias à volta dos observadores, o primeiro método de detecção de falhas baseado em modelos, o chamado filtro de detecção de falhas, foi proposto por Beard (1971) e Jones (1973). No seu trabalho pioneiro, Beard e Jones descobriram que, com a escolha adequada dos ganhos do filtro de realimentação, os resíduos obtidos no filtro teriam características especiais que permitiriam identificar as diferentes falhas.

Os filtros de detecção de Beard e Jones (BJDF) foram a base para o desenvolvimento dos sistemas de FDD baseados em modelos. Esta técnica tem-se desenvolvido muito desde então. A sua eficiência na detecção de falhas nos sistemas tem sido demonstrada por um grande número de aplicações de sucesso em processos industriais e sistemas de controlo automático. Hoje, os sistemas de diagnóstico de falhas baseados em modelos estão totalmente integrados em sistemas de controlo em veículos, robôs, sistemas de transporte, sistemas de energia e processos industriais, para mencionar apenas alguns dos sectores de aplicação.

Nas últimas duas décadas, as tendências na teoria de FDD são marcadas por contribuições que partem, tanto da comunidade científica, com métodos qualitativos e técnicas inteligentes computacionais, como do desenvolvimento de aplicações, principalmente impulsionado pela necessidade urgente do desenvolvimento de sistemas de controlo altamente confiáveis e seguros na indústria automóvel, em aeronáutica, em robótica e nos sistemas distribuídos em larga escala.

A ideia intuitiva da técnica de diagnóstco de falhas baseada em modelos é a de substituir a redundância de hardware por um modelo do processo, o qual é implementado sob a forma de software. Um modelo do processo é uma descrição quantitativa ou qualitativa da dinâmica do processo e do seu funcionamento nominal, que pode ser obtido utilizando técnicas conhecidas de modelação de processos. Desta forma, é possível reproduzir o comportamento do processo on-line, o qual, associado ao conceito de redundância de hardware, é chamado de conceito de redundância de software. A redundância de software é ainda chamada de redundância analítica.

Embora tenham sido desenvolvidos para fins diferentes, e por meio de técnicas diferentes, todos os sistemas de diagnóstico de falhas baseados em modelos têm em comum a utilização explícita de um modelo do processo, com base no qual são implementados algoritmos para o processamento de dados que são posteriormente recolhidos já com o sistema em funcionamento.

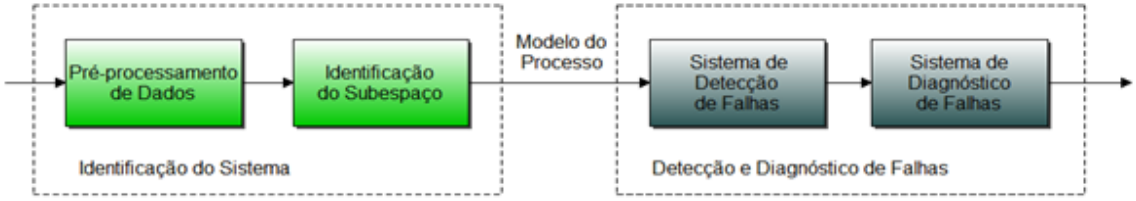

Figure 2.7: Processo de identificação do sistema real na obtenção de um modelo do processo.

Resíduos

Semelhante à redundância de hardware, no âmbito do conceito de redundância de software, o modelo do processo funcionará em paralelo com o processo e ambos terão as mesmas entradas. É expectável que as variáveis construidas a partir do modelo do processo estejam de acordo com as correspondentes variáveis do processo real, durante o funcionamento nominal, e que mostre um desvio evidente quando surgem falhas no processo. A fim de receber esta informação, é feita uma comparação entre as variáveis medidas no processo (sinais de saída) e as suas estimativas fornecidas pelo modelo de processo. A diferença entre as variáveis medidas no processo e as suas estimativas é denominada de residuos (*residual*). De forma simplista, se o valor dos resíduos for superior a zero então existe falha, caso contrário, não existe falha (ver figura 2.8). Contudo, devido à existência de ruído no processo, haverá sempre um valor residual, entre o modelo e o processo, diferente de zero, pelo que se estabelece um limite (*threshold*) a partir do qual é considerada a existência de falha.

Ao processo de criar as estimativas das saídas do processo e à construção da diferença entre as saídas e essas estimativas é chamado de geração de resíduos. O mesmo será dizer-se que o modelo do processo e a unidade de comparação compõem o gerador de resíduos.

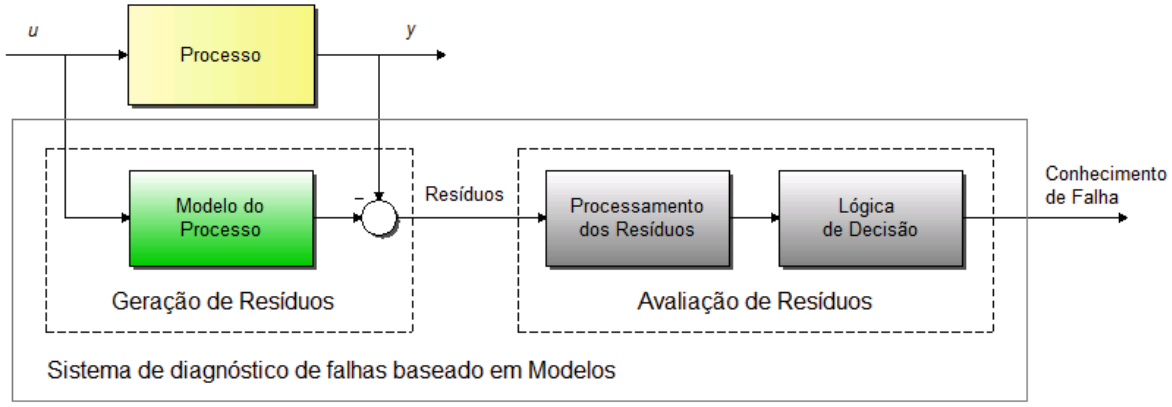

Figura 2.8: Sistema de FDD baseado em análise de Resíduos.

Nenhum processo pode ser modelado com exactidão, uma vez que existem perturbações internas e externas ao sistema que surgem ao longo do tempo, tais como o envelhecimento dos materiais. Assim, no sinal residual, a mensagem de falha é corrompida pelas incertezas do modelo ou pelas perturbações. Além disso, o isolamento e identificação de falhas requerem uma análise adicional dos resíduos gerados para distinguir os diferentes tipos de falha (pelo grau de severidade ou falhas distintas).

Um problema recorrente em técnicas de Detecção e Diagnóstico de Falhas baseado em modelos pode ser expresso como a filtragem / extracção da informação necessária sobre as falhas dos sinais residuais. Para este fim, duas estratégias diferentes foram desenvolvidas:

- Projectar o gerador de residuos por foma a alcançar uma dissociação entre a falha a ser detectada e as outras falhas, perturbações desconhecidos e incertezas do modelo.
- Extrair a informação sobre a falha em questão a partir dos sinais residuais por meio de pós-processamento dos resíduos. Este procedimento é chamado de avaliação residual.

A primeira estratégia tem sido intensamente seguida por muitos grupos de pesquisa que trabalham com diagnóstico de falhas baseado em modelos. Uma das técnicas mais comuns nesta área é a chamada técnica de diagnóstico de falha baseada em observadores. A ideia básica do diagnóstico de falhas baseado em observadores, é a de substituir o modelo do processo por um observador, que estimará com fiabilidade as saídas do processo. Uma abordagem muito recorrente é a utilização de filtros de Kalman como observadores (Boutayeb and Aubry, 1999, Gil, 2002).

Estimação de Falhas

No âmbito dos métodos baseados em identificação de parâmetros, a detecção das falhas é executada por uma estimativa de parâmetros on-line, como esboçado na figura 2.9, que são posteriormente comparados com os valores nominais dos parâmetros.

Na década de 90, houve uma intensa discussão sobre as relações entre os observadores e a estimação de parâmetros em sistemas de FDD, tendo as abordagens sido comparadas recorrendo a diversas "Benchmarks". Apesar do esforço de ambas as partes, para defender cada uma das abordagens, verificou-se uma aceitação generalizada de que ambas as abordagens têm vantagens e desvantagens, havendo sempre argumentos contra ou a favor de cada uma das abordagens.

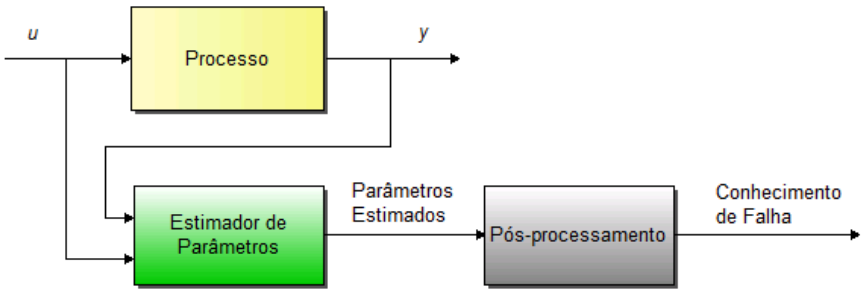

Figura 2.9: Descrição esquemática da Estimação de Parâmetros.

É interessante notar que a discussão nesse tempo era baseada na comparação entre um observador, como gerador de resíduos, e um estimador de parâmetros. Na verdade, do ponto de vista da estrutura do sistema FDD, as abordagens com observadores e com estimação de parâmetros são semelhantes na geração de resíduos, mas significativamente diferentes na avaliação

dos mesmos. A avaliação residual integrada no sistema FDD utilizando observadores é realizada por uma alimentação directa (*feedforward*) dos sinais residuais, enquanto que nos métodos de estimação de parâmetros é usado um algoritmo recursivo para processar os resíduos, com o objectivo da identificação de parâmetros, sendo as estimativas dos parâmetros posteriormente utilizadas na optimização do gerador de residuos (figura 2.10). Deste ponto de vista, o sistema de diagnóstico de falhas baseado em identificação de parâmetros tem uma estrutura em anel fechado, ao contrário do baseado em observadores que tem uma estrutura em anel aberto.

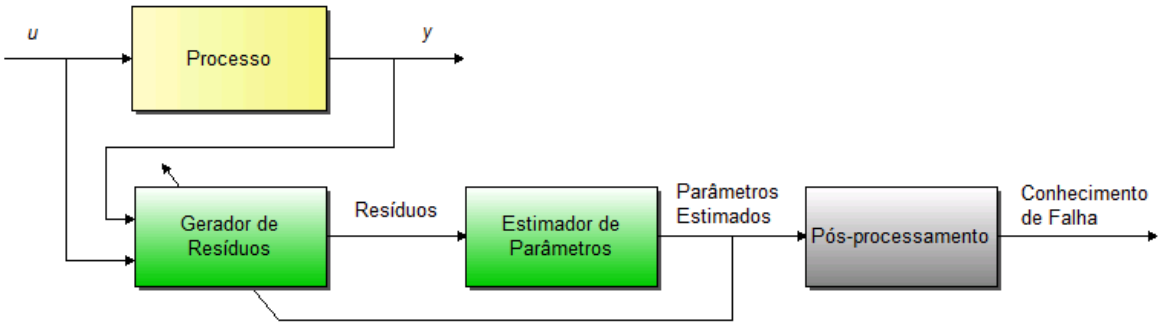

Figura 2.10: Descrição alternativa da Identificação de Parâmetros.

Os métodos baseados em observadores de estado e filtros de Kalman são ainda hoje objecto de investigação por parte da comunidade internacional. Nestas abordagens, os resíduos resultam do erro do observador, calculado a partir das saídas do processo e de um modelo de referência. Um observador pode ser desenvolvido de forma a ter baixa sensibilidade às incertezas do modelo e a perturbações externas. Contudo, para que o observador tenha o comportamento descrito, os modelos do processo devem ser muito precisos no que respeita à dinâmica do mesmo (Patton et al., 1989; Frank, 1993).

A ampla utilização de observadores com o propósito de diagnosticar falhas levou a que alguns investigadores, de forma errada, pensassem que, para a implementação de sistemas FDD baseados em observadores, fosse indispensável apurar a observabilidade do sistema e ser conhecedor da teoria à volta do espaço de estados. Na verdade, uma das diferenças essenciais entre o observador de estado e observador de diagnóstico, é que este último é essencialmente um observador das saídas do sistema, em vez de um observador de estado, frequentemente utilizado em controlo.

Muitas vezes, o desenvolvimento do sistema de FDD baseado em observadores é entendido como o desenvolvimento do observador em si, e o desempenho do sistema FDD é avaliado a partir do desempenho do observador. Esta abordagem leva a um foco excessivo na geração de resíduos e um menor foco no estudo dos problemas da avaliação dos resíduos. Na verdade, o papel mais importante do observador num sistema FDD é fazer com que os resíduos gerados sejam independentes dos sinais de entrada de processo e das condições iniciais do processo. O grau de liberdade de concepção adicional pode então ser usado, por exemplo, com a finalidade de aumentar a robustez do sistema.

2.2.2. FDD Não Baseado em Modelos

Uma das principais questões relacionadas com as abordagens baseadas em modelos é a disponibilidade e a qualidade do modelo. Os erros resultantes de modelos imperfeitos ou imprecisos afectarão o desempenho dos sistemas de diagnóstico de falhas (Patton et al., 2000). O uso de métodos robustos baseados em modelos resultam, por norma, em abordagens muito conservadoras e insensíveis a falhas, demasiado complicadas ou limitadas a certas classes de incertezas.

Desde o fim da década de 1990 tem-se verificado crescente interesse, por parte dos investigadores, em sistemas de FDD não baseados em modelos, especialmente nos que utilizam abordagens de inteligência artificial e "soft computing" tais como redes neuronais e lógica difusa (Patton and Korbicz, 1999; Korbicz et al., 2004; Kowal and Korbicz, 2005; Bocaniala and Palade, 2006; Witczak, 2006).

Monitorização do Estado

A monitorização de estado consiste na análise de sinais e de tendências e é baseada na análise no domínio do tempo e da frequência sem ser necessária a existência de modelos analíticos explícitos. Nesta abordagem, os indicadores de falha provêm dos sinais medidos através da análise de limites ou tendências desses sinais e por meio de métodos de análise espectral, v.g. FFT, Cepstrum e análise de envelope (Pau, 1981; Sturm and Bilhardt, 1991). Especialmente em máquinas rotativas (v.g. turbinas, máquinas elétricas), a análise espectral tem sido aplicada com sucesso na obtenção de diagnósticos detalhados e estimativas da restante vida útil dos sistemas. Os métodos de análise de sinais, em geral, não são os mais indicados, ao contrário das abordagens baseadas em modelos, na detecção de mudanças bruscas do comportamento do processo. Contudo, uma grande vantagem surge do facto de poderem ser aplicados a sistemas de complexidade superior sem a necessidade dos sinais de entrada do processo serem conhecidos.

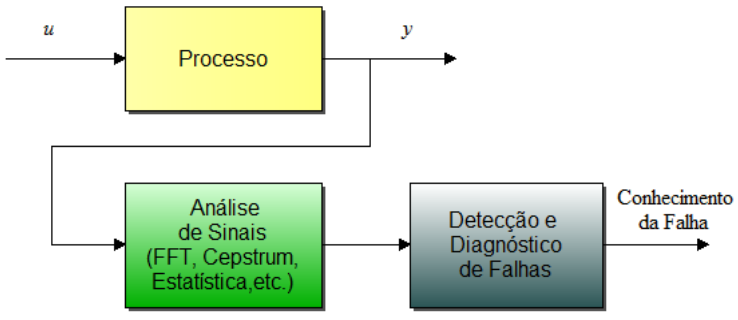

Figura 2.11: Diagrama de um sistema FDD baseado em análise de sinais.

Na maioria dos casos, as diferentes falhas no processo mostram uma tendência distinta nos valores medidos nos sensores. Estas tendências distintas podem ser utilizadas na identificação das falhas no processo. A análise de tendências pode ser definida como a procura de padrões ao longo do tempo, a fim de identificar a forma como os sinais mudam e evoluem em diferentes direcções. Assim, uma classificação e análise eficazes das tendências do processo podem ser a chave para uma mais rápida detecção de falhas (Venkatasubramanian and Rengaswamy, 2003).

Alguns trabalhos (Konstantinov and Yoshida, 1995; Huang et al., 2010) mostraram que a modelação de tendências pode ser utilizada para explicar vários eventos importantes, diagnosticar falhas e prever estados futuros. A premissa da análise de tendências é que as falhas de hardware deixam assinaturas características nos dados recolhidos dos sensores, pelo que podem ser utilizadas ferramentas de processamento de dados para realçar o efeito da falha (Aravena, 2002). Em vez de modelos matemáticos que permitem a determinação do comportamento nominal, propõe-se fazer uso de uma coleção de dados para criar descrições empíricas de várias condições de funcionamento.

FDD Inteligente

Em Patton et al. (2000b) foi proposta uma combinação do conhecimento numérico (quantitativo) e simbólico (qualitativo) do sistema numa única abordagem. A ideia foi inspirada em trabalhos anteriores que utilizavam observadores para gerar resíduos e lógica difusa para tomada de decisões. O conceito subjacente consiste na estruturação de uma rede neuronal no formato de lógica difusa de forma a permitir a geração de resíduos (através do treino da rede neural para modelar as dinâmicas não lineares do sistema) e diagnóstico das falhas (através de lógica difusa). Em Kowal and Korbicz (2005), a modelação e diagnóstico neuro-difusos são considerados com a adição de um “threshold” adaptativo no processo de detecção de falhas, de forma a alcançar um nível de robustez superior.

Uma das vantagens de utilizar a abordagem com FDI inteligente, especialmente redes neurais para FDD, é a sua capacidade de modelar qualquer sistema não-linear (Patton and Chen, 2000b). Em termos de FDD, as redes neurais têm características que permitem encarar um sistema como uma "caixa preta" e, portanto, a capacidade de aprender a partir de exemplos e treino, exigindo pouca ou nenhuma informação e conhecimento da estrutura do sistema a priori.

Trabalhos de pesquisa mais recentes podem ser encontrados em (Mirea and Patton, 2006; Witczak, 2006; Puig e tal., 2007), enquanto exemplos de aplicações podem ser encontrados em Yu and Gomm (2003), Uppal et al. (2006) e Anand et al. (2007). Exemplos de uma abordagem inteligente para FDD em sistemas de aeronaves, aparecem em publicações tais como An (1998) e Spirkovska et al. (2005) e suas referências.

2.3. Programação de PLCs

Os autómatos programáveis, ou Controladores Lógicos Programáveis (PLC), assumem actualmente um papel importante em diversas instalações industriais, tendo a sua utilização sido generalizada em diversas áreas de automação e controlo. A possibilidade de operar em ambientes adversos, onde são expostos a vibrações ou poeiras, e a sua insensibilidade ao ruído eléctrico, um fenómeno frequente em instalações industriais. Para além das características de hardware robustas, os PLCs dispõem de sistemas operativos simples e exclusivamente dedicados à execução do programa de controlo, estando por isso menos susceptíveis a interrupções de processamento inesperadas que podem interferir com as características temporais do sistema, como por exemplo o tempo de amostragem.

Algumas referências a PLCs podem ser encontradas em Clements-Jewery e Jeffcoat (1996), Bolton (1997), Dunning (1998) e Frey e Litz (2000). A arquitectura genérica de um PLC é ilustrada na figura 2.12.

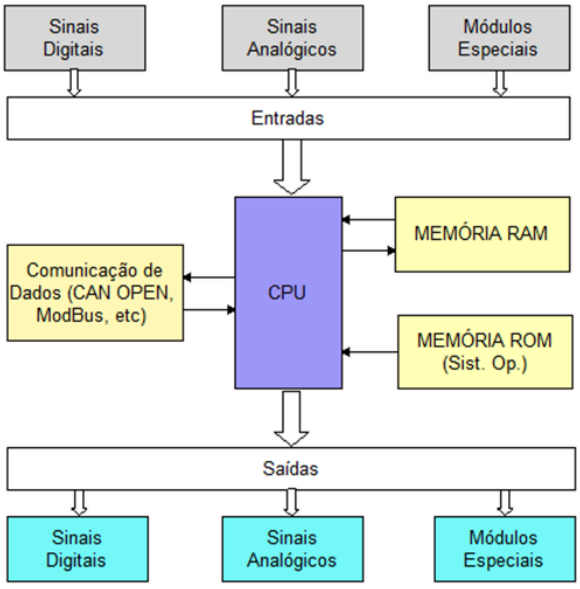

Figura 2.12 - Arquitectura de um PLC.

A execução do programa é realizada em três partes: aquisição de dados, processamento e actualização das saídas. Na primeira etapa é efectuada a aquisição de dados, onde são lidos os sinais dos sensores. Dependendo dos módulos instalados no PLC, este pode receber sinais analógicos ou digitais e estes podem tomar valores de corrente ou de tensão. Os valores lidos dos sensores são guardados em memória para serem posteriormente utilizados na etapa de processamento. Na etapa de processamento é realizado um conjunto de operações aritméticas, de acordo com a lei de controlo implementada, cujo objectivo final é a determinação do valor das saídas. Na última etapa, as saídas são actualizadas com os valores obtidos durante o processamento,

estando estas geralmente ligadas a actuadores (motores eléctricos, actuadores pneumáticos, etc.). Os valores de saída podem, tal como os valores de entrada, ser analógicos ou digitais, dependendo do que se pretende actuar.

2.3.1. Linguagens

Reconhecendo a necessidade de um padrão para PLC's, em 1979, por parte da comunidade industrial internacional, foi designado um grupo de trabalho da IEC (International Electro-technical comission) com este propósito. Este grupo tinha como objetivo analisar o projeto completo de PLC's (inclusive hardware), instalação, testes, documentação, programação e comunicações. Este grupo designou oito frentes de trabalho para desenvolver diferentes partes do padrão para PLC's. A primeira parte do padrão foi publicada em 1992 (General Information – conceitos e definições de terminologias básicas). A parte três, referente às linguagens de programação, foi publicada em 1993.

A norma IEC 61131-3 é o único padrão global para programação de controlo industrial. Uma interface de programação padrão permite que pessoas com diferentes habilidades e formações, criem elementos diferentes de um programa em etapas diferentes do ciclo de vida de um software: especificação, projeto, implementação, teste, instalação e manutenção. O padrão inclui a definição da linguagem Grafo Sequencial de Funções (SFC), usada para estruturar a organização interna do programa, e de mais quatro linguagens: Texto Estruturado (ST), Diagrama de Blocos Funcionais (FBD), Diagrama Ladder (LD) e Lista de Instruções (IL).

Uma linguagem pode mostrar-se mais simples e legível, quando comparada com as outras, dependendo do que se pretende desenvolver e da sua complexidade. Em seguida é feita uma breve descrição das diferentes linguagens referidas.

Texto Estruturado (*Structured Text*)

O texto estruturado (ST) é uma linguagem textual de alto nível semelhante ao C, C++ e ao PASCAL. Permite a indentação do código e a inserção de comentários que facilitam a compreensão do texto. Esta linguagem é principalmente destinada a resolver problemas de controlo analógico em tempo real.

A norma IEC-61131-3 define o ST como uma linguagem que consiste em declarações que podem ser usadas para atribuir valores a variáveis utilizando vários tipos de operadores aritméticos, booleanos, de comparação, execução condicional e ciclos iterativos. Podem ainda ser escritos blocos de funções utilizando o ST, que podem depois ser chamados em diversos pontos do programa.

Na Figura 2.13 são apresentados alguns exemplos da sintaxe de diferentes operações.

a)

```
A := B + C * ( D - E );

F := G AND NOT H;
```

b)

```
IF ( A = TRUE ) THEN
      B := X;
ELSE
      B := Y;
END_IF;
```

c1)

```
FOR  I:=100 TO 1 BY -1 DO
      Canal [I].status := ON;
END_FOR;
```

c2)

```
WHILE J < 5 DO
      Z := F * ( I + J );
END_WHILE;
```

Figura 2.13: Exemplos de diferentes operações em texto estruturado: a) aritméticas e boleanas; b) execução condicional; c1) e c2) ciclos iterativos.

Diagrama de Blocos Funcionais (*Function Block Diagram*)

O Diagrama de Blocos Funcionais **(**FBD) é uma linguagem gráfica muito utilizada na representação de sistemas de controlo industriais adoptando um conjunto de símbolos e convenções definidos na IEC-1131-3 (1993). Representa um sistema de controlo em termos de fluxo de sinal entre os elementos de processamento, semelhante à metodologia adoptada para o fluxo de sinal de circuitos electrónicos.

A linguagem FBD é mais adequada para expressar o comportamento contínuo de um sistema e deve ser considerada quando há uma necessidade de sequenciamento / prioritização de funções.

Nesta linguagem é possível a construção de novos blocos funcionais a partir de blocos mais simples como blocos AND, OR ou NOT, reduzindo o tamanho do programa e melhorando a legibilidade de todo o programa.

Esta linguagem permite uma acção retroactiva do sinal, isto é, permite que um bloco de funções utilize os valores da sua saída em blocos ligados à sua entrada ou directamente a uma das suas entradas.

Na Figura 2.14 é apresentado um exemplo de um diagrama de blocos funcionais.

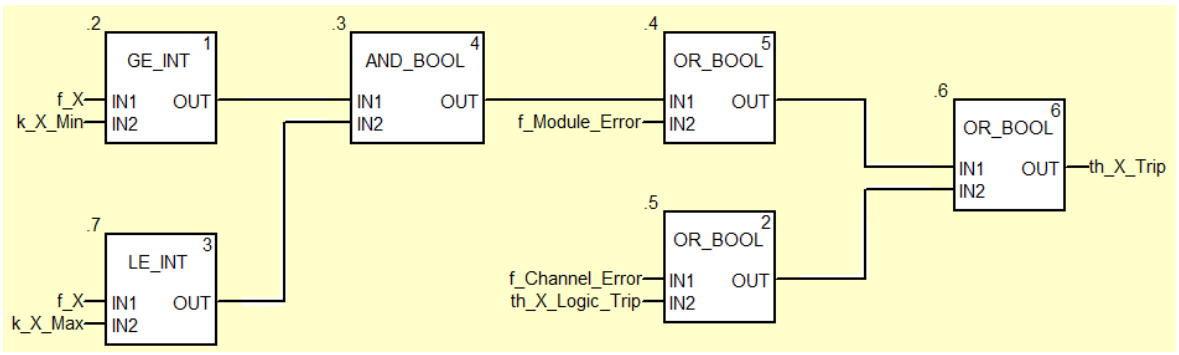

Figura 2.14: Exemplo de um sistema de controlo com retroacção implementado em FBD.

Diagrama de Escada (*Ladder Diagram*)

O Diagrama de Escada (LD) é uma linguagem gráfica desenvolvida com base em diagramas de circuitos eléctricos (contactos, bobines, etc.), convencionalmente utilizada para representar operações de lógica de relés. Muitos dos símbolos e terminologias foram também adotadas a partir desses diagramas. É, por isso, uma linguagem de fácil e rápida compreensão quando aplicada em programas de complexidade reduzida.

Em muitos problemas de controlo, verifica-se que parte da lógica é repetida em diferentes pontos do programa. Com os programas desenvolvidos em diagrama de escada, a reutilização do código não é possível, o que resulta numa ineficiente utilização da memória.

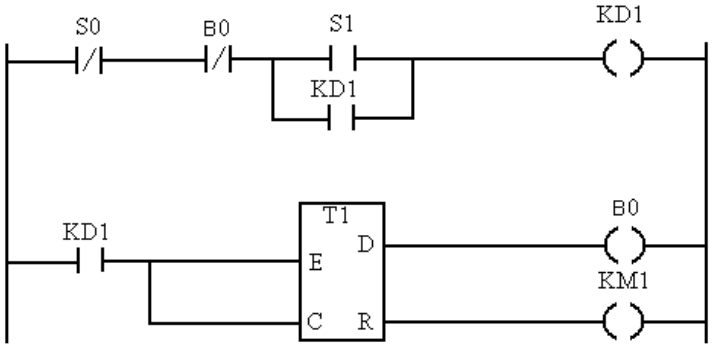

Figura 2.15: Exemplo de um programa desenvolvido em LD.

Lista de Instruções (*InstructionList*)

A Lista de Instruções (IL) é uma linguagem de programação baseada em texto e assemelha-se à linguagem de baixo nível utilizada na programação de microprocessadores. É simples de implementar e, portanto, adotada por diversos fabricantes de PLCs.

Esta linguagem é geralmente utilizada para problemas simples que requerem código altamente optimizado. Tem regras de semântica muito bem definidas, que são utilizadas nas instruções.

A conversão de IL para outras linguagens é difícil e só pode ser feita em certas circunstâncias. Por outro lado, a conversão para IL é relativamente mais fácil, mas não necessariamente mais simples.

```
LD      SM 0.1          On for One Scan
MOVD    # 4000 , VD200  Put 4000 in address VD200
LD      SM 0.1
MOVW    # 41 , VW10      Put 41 in address VW10
LD      SM 0.1
DIV VW10 , VD200        DIV|Value in Address
MEND                    VD200 on the Value VW10
                        put result in the address VW200
```

Figura 2.16: Exemplo de um programa desenvolvido em IL.

Grafo Sequencial de Funções (*SequentialFunctionChart*)

O Diagrama Sequencial de Funções (SFC) é uma linguagem que foi desenvolvida com base no funcionamento do Grafcet, sendo constituida essencialmente por estados e transições. Fornece um método flexível e hierárquico de representar graficamente sistemas de controlo complexos.

Um qualquer processo industrial pode ser dividido em diversos estados ou etapas bem definidas, que seguem uma determinada sequência. Em cada um destes estados podem ser executadas uma ou mais acções. Estas acções podem ser desenvolvidas em qualquer uma das linguagens referidas anteriormente. Para uma determinada acção terminar é necessário que as condições de transição para o próximo estado sejam satisfeitas.

Podem existir sequências alternativas num processo e estas podem ser representadas usando caminhos divergentes no diagrama. Na Figura 2.17 é apresentado um exemplo de um programa desenvolvido em SFC.

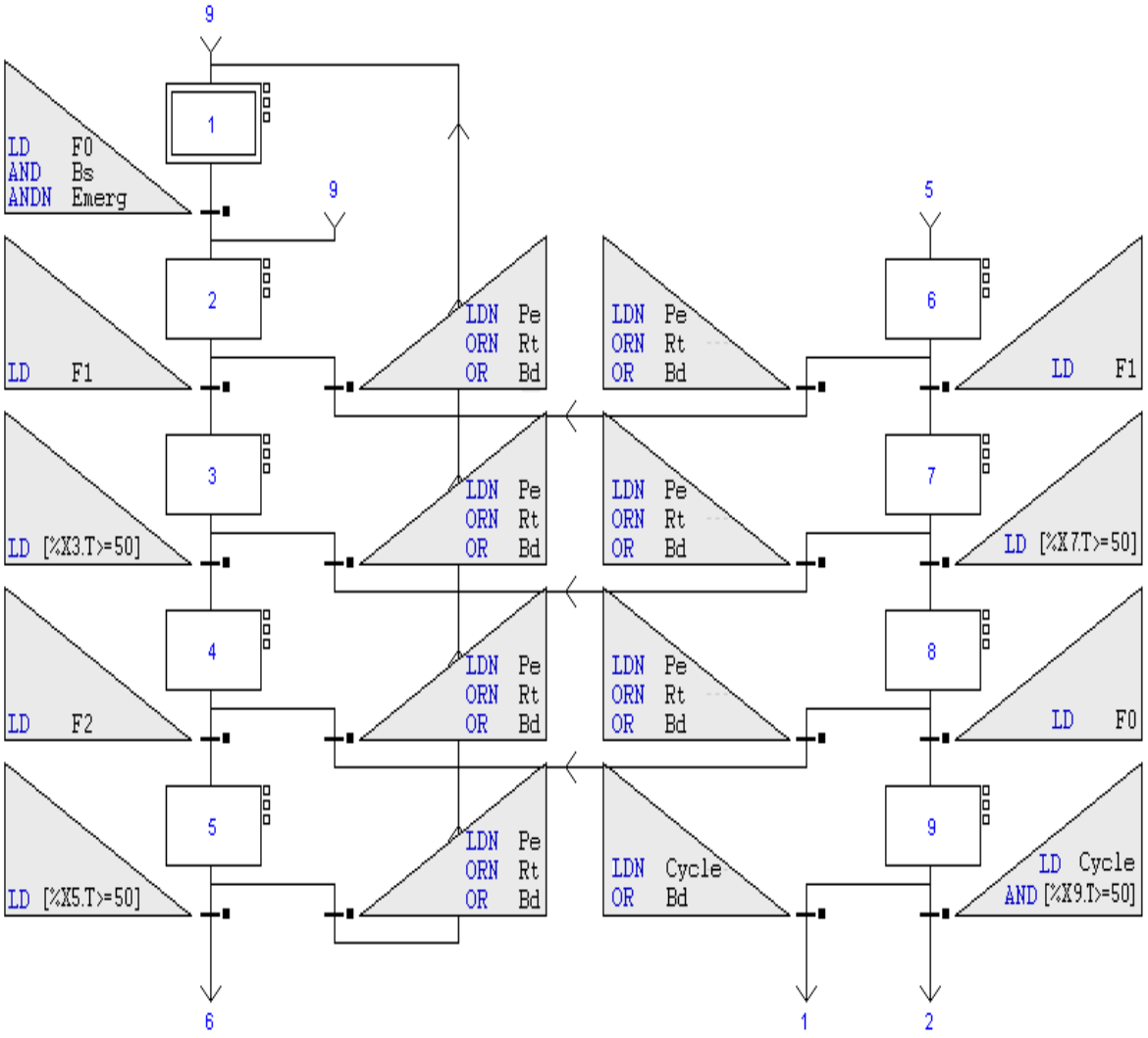

Figura 2.17: Exemplo de um programa desenvolvido em SFC.

3. Sistema de Supervisão

No controlo de processos dinâmicos, a crescente complexidade dos processos obriga à consideração de sistemas de supervisão que promovam fiabilidade e autonomia a esses processos.

Na primeira secção deste capítulo é apresentada a abordagem proposta para a arquitectura do sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas. Esta arquitectura consiste na divisão do sistema em três níveis – nível de processo, nível de execução e nível de supervisão. No nível do processo encontram-se os componentes do processo, os sensores e os actuadores. O nível de execução contém os módulos de FDD, de controlo e de reconfiguração. No nível de supervisão, encontra-se o supervisor que será responsável pela avaliação das falhas e identificação do modo de funcionamento, bem como pela tomada de decisão sobre a reconfiguração do sistema, pela interface homem-máquina e pela validação de referências.

Na secção 3.2 é apresentado o dimensionamento do sistema FDD e do supervisor, sendo descrito o seu funcionamento e a sua implementação em PLCs.

3.1. Arquitectura

Em sistemas de supervisão e controlo tolerante a falhas é usualmente considerada uma estrutura dividida em três níveis: o nível de processo, o nível de execução e o nível de supervisão. Na Figura 3.1 é apresentada a estrutura global proposta da arquitectura do sistema, com a indicação dos módulos principais em cada nível do sistema e da informação que é trocada entre os diferentes módulos e níveis.

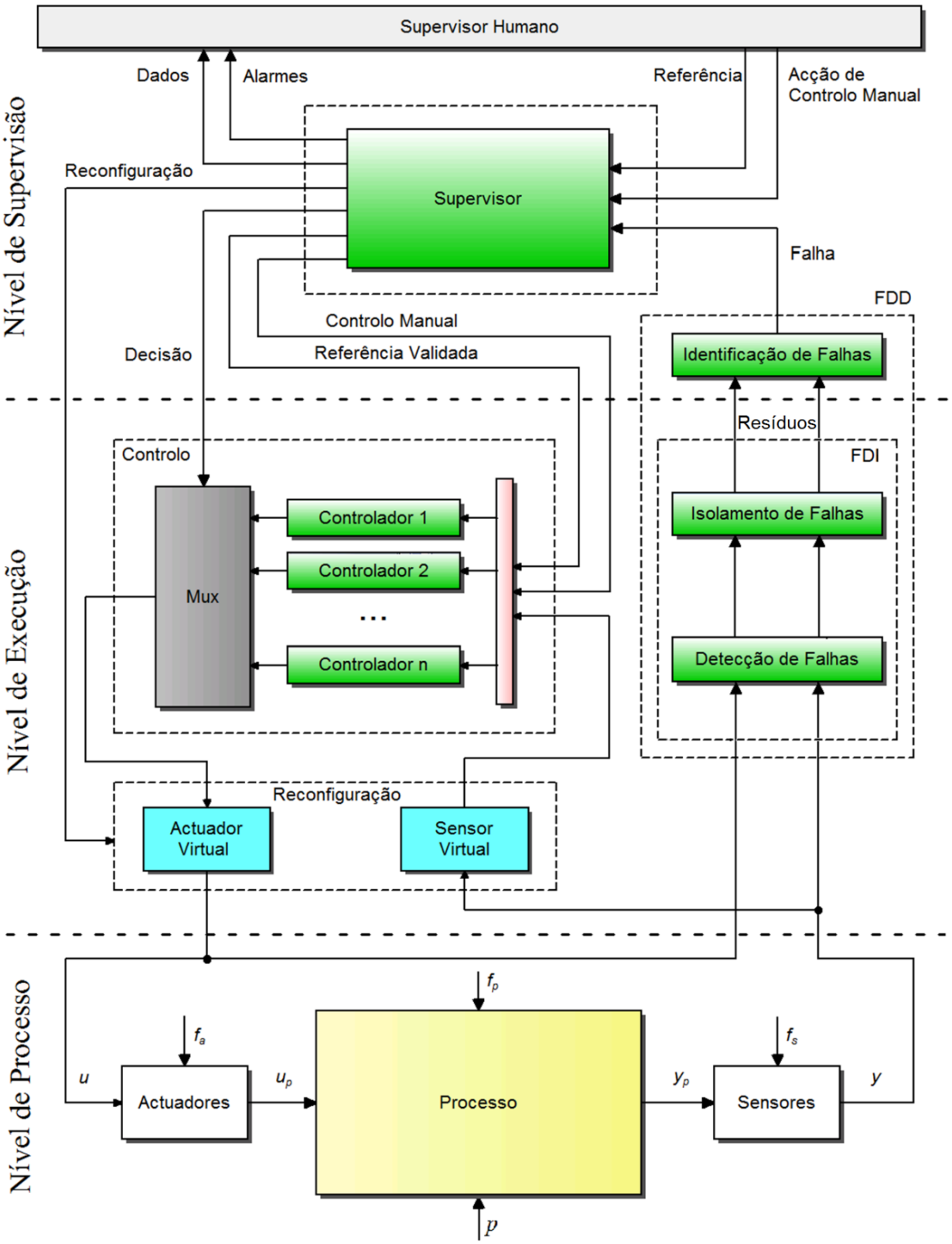

Figura 3.1: Diagrama da arquitectura do sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas.

A abordagem proposta para o projecto dos sistemas de diagnóstico e de supervisão engloba os seguintes aspectos fundamentais:

i. **Modelação**: sendo a abordagem proposta baseada no modelo do processo, considera-se a existência de um modelo, geralmente não-linear, obtido por via analítica ou por identificação, como por exemplo, o espaço de estados do sistema. Pretende-se que este modelo represente, o mais fielmente possível, o processo real nos seus vários modos de funcionamento, nominal 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, e que serão posteriormente utilizados na detecção e diagnóstico das falhas.

ii. **Validação de sinais**: os sinais de saída do processo devem ser sujeitos a um processo de acondicionamento, filtragem e validação. O sinal produzido pelo sensor é avaliado e efectuam-se operações de tratamento de dados, de modo que a informação sobre as variáveis do processo seja a mais verdadeira possível. As principais operações de validação de um sinal sensorial consistem na análise dos seus limites, da razão de variação e do espectro de frequências. É também feita uma análise aos limites dos sinais de actuação e de referência.

iii. **Sistema de FDD**: O sistema de detecção e 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. Os sinais utilizados por este módulo resultam de uma análise estrutural do processo, onde se estabelecem relações analíticas redundantes, baseadas essencialmente em leis da física e e em observadores, que permitem estimar o valor de variáveis que não sejam mensuráveis ou que estejam associadas a sensores com falha. A saída gerada pelo módulo engloba a identificação de uma falha, no caso de existir uma, e um conjunto de resíduos representativos das falhas previstas, sendo usados pelo sistema de supervisão para identificação do modo de funcionamento do processo.

iv. **Sistema de supervisão**: O sistema de supervisão é responsável pelo fornecimento de serviços ao supervisor humano, pela reconfiguração do sistema e pela análise das falhas e identificação do modo de funcionamento. Estas acções são projectadas 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 objectivo principal garantir que o sistema global é estável e tolerante a falhas. Na situação em que o sistema de controlo não apresenta capacidade de tolerância a uma determinada falha, o supervisor deverá conseguir parar todo o processo em segurança.

v. **Interface homem-máquina**: Para que um sistema de supervisão e controlo tolerante a falhas seja aceite e compreendido pelo supervisor humano, é necessário que a interface homem-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. Devem ser gerados alarmes 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. Deve ainda ser permitido ao supervisor humano regular as referências pretendidas e eventualmente regular a acção de controlo aplicada ao processo.

vi. **Sistema de controlo**: Considerando que o processo é caracterizado por um conjunto de modelos lineares com incerteza (múltiplos modelos), o sistema de controlo é definido por um conjunto de controladores, associados a cada modelo do processo. Para cada modelo do processo, deve existir, um controlador que garanta estabilidade e um bom desempenho, apresentando alguma robustez e tolerância a falhas de menor grau de severidade.

3.1.1. Nível de Processo

No nível de processo, encontram-se os actuadores, os sensores e o processo (ou instalação). O processo é caracterizado por um sistema dinâmico, com uma ou mais entradas de actuação u_p e saídas mensuráveis y_p. O processo está sujeito a perturbações p e é constituído por vários componentes sujeitos a falhas f_p (funcionamento defeituoso, alteração do comportamento dinâmico de um dado componente, etc.).

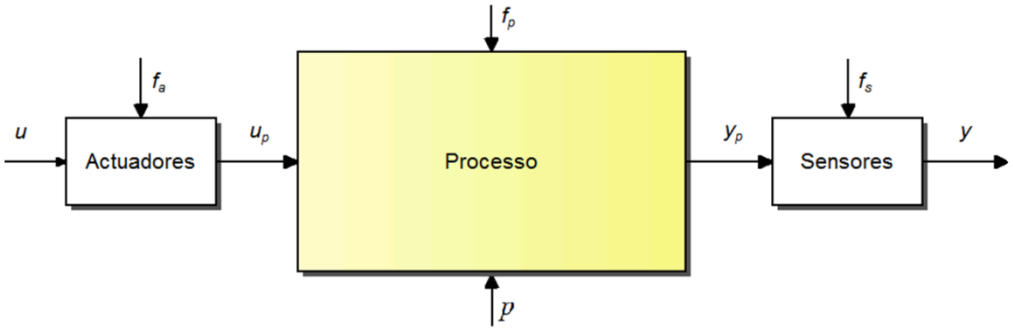

Figura 3.2: Nível de Processo

Os actuadores caracterizam-se por serem a ponte entre os sinais de controlo aplicados (em corrente ou tensão) e a acção a ser despoletada no sistema (abertura ou fecho mecânico de válvulas, accionamento mecânico por meio de motores eléctricos, etc.). Estes podem ser afectados por

falhas, f_a, tais como saturação, desvios do funcionamento nominal ou mudanças no seu comportamento dinâmico.

Os sensores permitem, através de transdutores, obter os valores das grandezas mensuráveis y_p do processo (v.g. temperaturas, velocidades, caudais, etc.) e transformá-los em sinais eléctricos y (sob a forma de corrente ou tensão). Contudo, estes sinais podem ser corrompidos pela presença de ruído ou devido à ocorrência de falhas f_s, resultantes de quebras de funcionamento ou desvios do seu funcionamento normal.

O nível de processo é então uma representação da instalação a ser controlada, sendo aqui também representada a incidência das falhas ou perturbações nos sensores (f_s), nos actuadores (f_a) ou no próprio processo (f_p e p).

3.1.2. Nível de Execução

O segundo nível da arquitectura, corresponde ao nível de execução e inclui os módulos de detecção e isolamento de falhas (FDI), de reconfiguração e do sistema de controlo (figura 3.3).

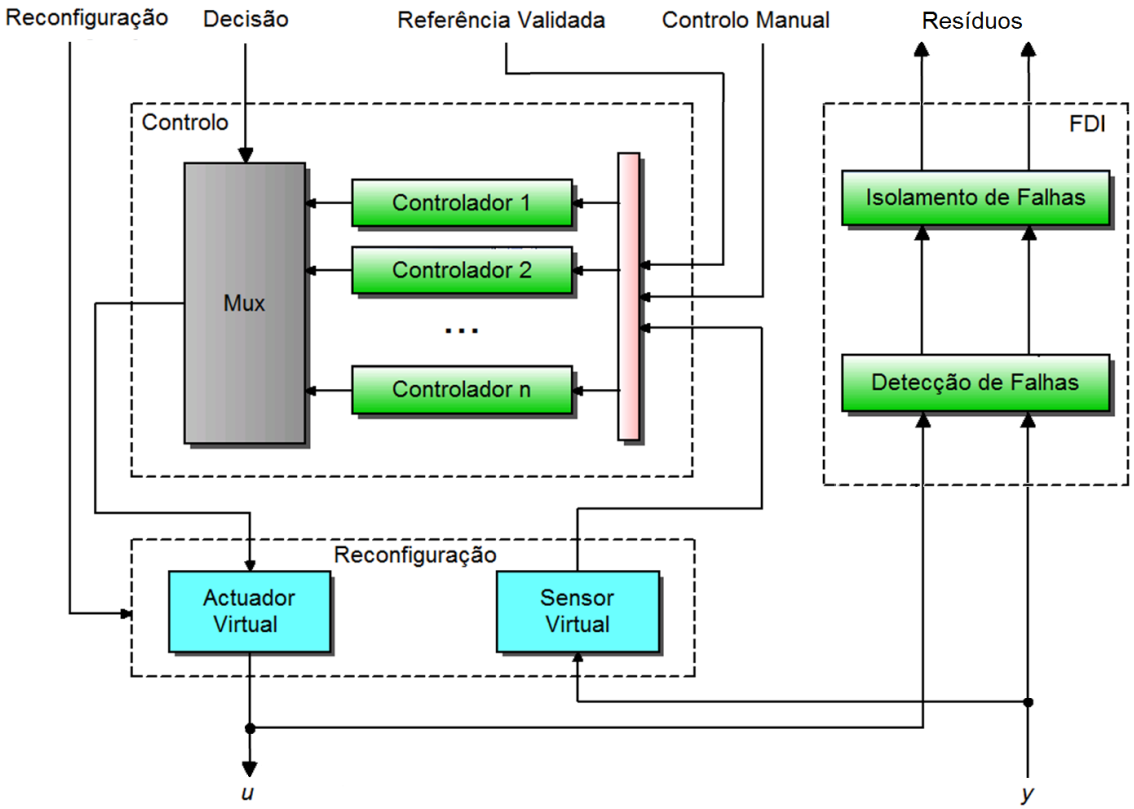

Figura 3.3: Nível de execução.

Os submódulos que integram o módulo de FDI realizam duas tarefas distintas. A geração de características (*feature generation*): utilizando os sinais mensuráveis obtém-se um conjunto de

características do processo, através da aplicação de métodos de processamento de sinal, de estimação dos estados, de identificação ou de estimação de parâmetros ou de relações de paridade, que possibilitam a detecção de falhas no processo. A segunda tarefa consiste no isolamento das falhas (*fault isolation*): determina-se a localização das falhas e o instante temporal da sua detecção, gerando sintomas analíticos ou heurísticos a partir da caracterização efectuada anteriormente. Esta informação é relevante para a determinação da severidade das falhas em questão e para a tomada de decisões por parte do módulo de supervisão. Será feita uma descrição mais detalhada sobre este módulo na seguinte secção.

O sistema de controlo recebe informação do nível de supervisão, referente ao modo de funcionamento, à referência já validada e ao controlo manual (acção de controlo directa). Os sinais que envia ou recebe do processo passam obrigatoriamente pelo sistema de reconfiguração, de forma a impedir o controlador de utilizar valores errados durante uma falha nos sensores ou nos actuadores. Quanto à estrutura do controlador, assume-se que o processo é representado por um conjunto de modelos lineares com incertezas, sendo o sistema de controlo constituído por um conjunto de controladores projectados com o objectivo de gerar acções de controlo capazes de assegurar, de uma forma robusta, os requisitos de estabilidade e desempenho, para cada um dos modelos considerados. É ainda considerado um controlador que possibilite, em caso de falhas que ponham em causa a integridade da instalação ou dos operadores humanos, executar, de uma forma segura, uma operação de paragem do funcionamento do processo.

O módulo de reconfiguração, tal como referido anteriormente, encontra-se entre o sistema de controlo e o processo. Tem como principal objectivo manter o processo em funcionamento de uma forma controlada usando uma estrutura alternativa do sistema, baseada em redundância. A sua tarefa consiste na geração de sinais representativos de sensores e actuadores virtuais, com o objectivo de proporcionar uma redundância analítica dos sensores e actuadores reais. Desta forma, é possível, sempre que seja identificada uma falha nos sensores ou nos actuadores, o sistema de controlo utilizar os valores dos sensores e actuadores virtuais para o cálculo da nova acção de controlo, bastando para isso um sinal do supervisor (*Reconfiguração*) que comute entre os valores dos sensores ou actuadores reais e os valores dos sensores ou actuadores virtuais (figura 3.4).

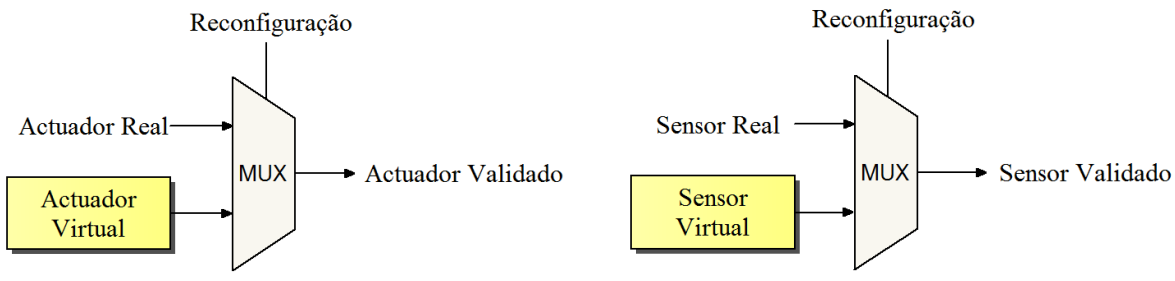

Figura 3.4: Módulo de reconfiguração de actuadores (à esquerda) e sensores (à direira)

3.1.3. Nível de Supervisão

Os módulos que integram o nível de supervisão realizam as tarefas de diagnóstico de falhas e supervisão e comunicam, através de uma interface homem-máquina, com o supervisor humano.

Diagnóstico de falhas: usando os resíduos resultantes da detecção e isolamento de falhas e da validação das saídas medidas, efectua-se a sua identificação e classificação em classes de risco (*hazard classes*) e é produzida a informação necessária à localização do componente em falha e à avaliação do grau de severidade da falha.

Supervisão: o supervisor utiliza a informação relativa ao diagnóstico de falhas e à validação dos sinais dos sensores para identificar as situações de falha e o modo de funcionamento do processo. Dependendo da classe de risco e do correspondente grau de severidade são geradas acções automáticas de paragem, de mudança de operação ou de reconfiguração, de forma a garantir estabilidade, um bom desempenho e tolerância a falhas no sistema em malha fechada. As acções poderão ser decididas pelo supervisor de uma forma automática ou pelo supervisor humano.

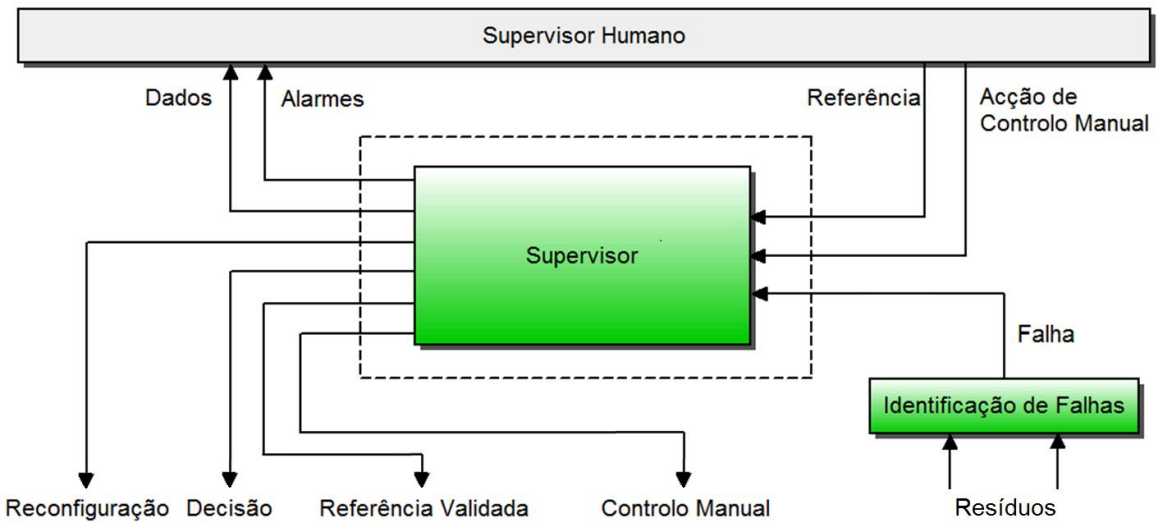

Figura 3.5: Nível de supervisão

A interface estabelecida entre o sistema de supervisão e o supervisor humano permite, a este último, ter acesso a informação em tempo real dos alarmes e dos estados do sistema. O supervisor humano pode alterar a referência que o sistema deve seguir e ainda definir manualmente a acção de controlo a ser aplicada. Caso seja definido o modo de operação manual, o supervisor limita-se à validação dos valores da acção de controlo, definida manualmente pelo supervisor humano, enviando-os em seguida para o sistema de controlo. O supervisor automático só intervém quando existir o risco da acção de controlo manual, imposta pelo supervisor humano, pôr em causa a integridade da instalação ou do próprio operador humano.

3.2. Metodologias

Nesta secção serão descritas as metodologias consideradas para cada um dos módulos que compõem o sistema de FDD, de Supervisão e de Reconfiguração.

3.2.1. Módulo de FDI

O módulo de FDI, como referido anteriormente, engloba a detecção e o isolamento das falhas que ocorram no sistema. O mecanismo de detecção de falhas proposto consiste na aplicação de um conjunto de diferentes metodologias com diferentes objectivos, mas que se complementam no objectivo de detectar qualquer falha que ocorra em componentes do processo ou em sensores e actuadores.

Na abordagem proposta para a detecção das falhas são utilizadas as seguintes metodologias:

- estimação de parâmetros;
- equações de paridade (PEQ);
- observadores

No que respeita à detecção de falhas, é feita, numa primeira fase, a estimação recursiva dos parâmetros, θ, do modelo, considerando modelos ARX de regressão polinomiais. São obtidos os resíduos resultantes das equações de paridade e são estimadas variáveis do processo, $\hat{x}$, utilizando um observador. Estes dados são em seguida validados, utilizando, para esse fim, os dados correspondentes ao funcionamento nominal (θ_n, X_n), previamente obtidos durante a etapa de modelação do sistema (ver figura 3.4), e ainda os valores actuais das entradas e saídas do processo, *u* e *y*, respectivamente, para aferir se existe falha ou não.

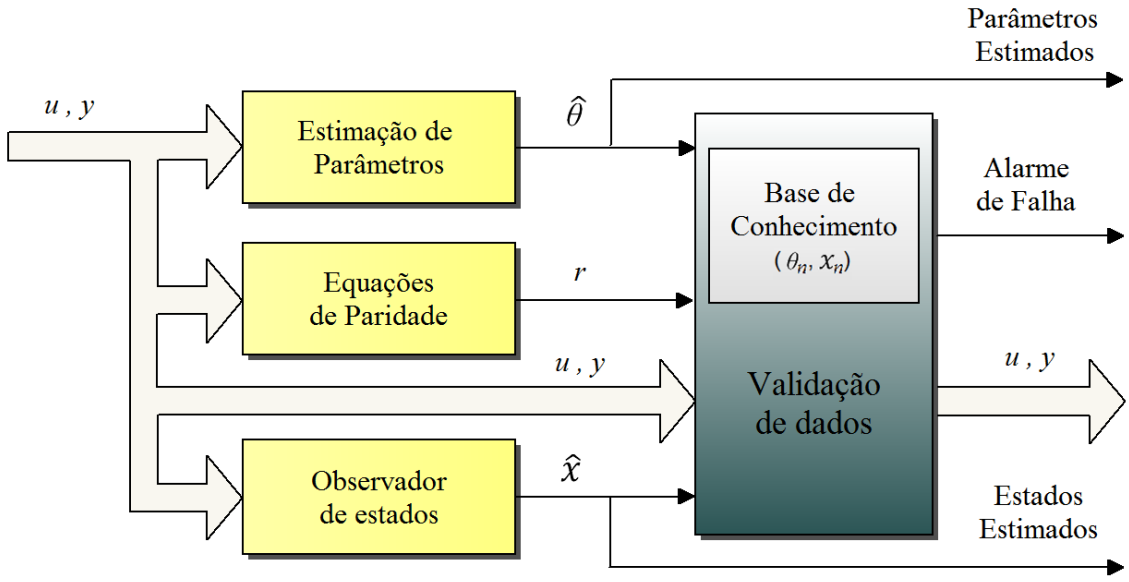

Figura 3.6: Sistema de detecção de falhas proposto.

Sendo o objecto de estudo desta tese um sistema não linear, a abordagem proposta neste trabalho para a sua modelação passa por serem considerados múltiplos modelos, todos eles lineares, sendo cada um deles associado a um modo de funcionamento do sistema. Contudo, ao serem considerados múltiplos modelos, deve ter-se em atenção os problemas associados à transição entre eles. Uma das desvantagens é que a alteração de parâmetros que se verifica durante essa transição pode resultar em eventuais falsos alarmes. Outra desvantagem é quando o sistema se encontra na fronteira entre dois modos de funcionamento, e alterna repetidamente entre os respectivos dois modelos. Este tipo de comportamento pode levar o sistema à instabilidade. Uma possível abordagem para tornar a transição entre modelos mais "suave", é através de uma solução difusa, onde é feita uma ponderação dos vários modelos.

Estimação de Parâmetros

Considerando *Z*, o conjunto de dados observados ou adquiridos em *N* amostras,

$$\mathrm{Z}^N = \{y(1)\ u(1);\ y(2)\ u(2); \dots; y(N)\ u(N)\} \tag{3.1}$$

e sendo $\hat{\theta}$, o vector de parâmetros a estimar, utilizando o modelo ARX, tem-se um vector de parâmetros a estimar dado por:

$$\hat{\theta} = \left[a_1\ a_2 \dots\ a_{n_a}\ b_1\ b_2 \dots\ b_n\right] \tag{3.2}$$

O objectivo é realizar o mapeamento dos dados observados nos parâmetros do modelo, considerando que o erro de predição tem que obedecer a um critério de minimização de uma determinada função de custo J (ver eq. 3.3).

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}(Z^N) = \min J(\theta, Z^N) \tag{3.3}$$

Sabe-se que através de uma função de regressão linear é possível prever o valor de uma determinada variável. Esta forma de predição, será utilizada para estimar parâmetros, mas primeiro é necessário obter o vector de regressão, *Φ*, que é a representação matricial do conjunto de dados Z. Este vector é obtido na fase de identificação do sistema.

Considerando um modelo ARX, passando da forma polinomial

$$A(q^{-1})y(k\,) \;=\; B(q^{-1})u(k\,) + \;e(k) \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned} y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + \cdots + a_{n_a} y(k-n_a) = \\ = b_1 u(k-1) + \cdots + b_{n_b} u(k-n_b) + e(k) \end{aligned} \tag{3.5}$$

para uma representação matricial, obtem-se

$$\begin{bmatrix} y(k-n_a) \\ \vdots \\ y(k-1) \\ y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y(k-n_a-1) & -y(k-n_a-2)\cdots & -y(k-2n_a) & u(k-n_a)\cdots u(k-n_b-n_a) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -y(k-2) & -y(k-3) & \cdots -y(k-n_a-1) & u(k-1)\cdots u(k-n_b-1) \\ -y(k-1) & -y(k-2) & \cdots -y(k-n_a) & u(k) \quad \cdots \quad u(k-n_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n_a} \\ b_0 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e(k-n_a) \\ \vdots \\ e(k-1) \\ e(k) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ou

$$Y = \Phi \cdot \theta + E \quad (3.7)$$

Realiza-se a regressão linear na forma:

$$\hat{Y} = \Phi \cdot \theta \quad (3.8)$$

Por último, é definido o erro de predição (ou resíduo da regressão) como

$$E = Y - \hat{Y} \quad (3.9)$$

Para a estimação dos parâmetros, é utilizado o método dos mínimos quadrados, um método analítico que tem a importante característica do mínimo global da função de erro ser sempre encontrado. As condições necessárias para se aplicar os mínimos quadrados são:

i. O vector erro, *E*, não ser correlacionado com Φ e θ ;

ii. A matriz de covariância do erro ser dada por $\sigma^2 I_N$, com $\sigma^2 > 0$;

iii. Os vectores colunas de Φ serem linearmente independentes.

O método dos mínimos quadrados é baseado no critério de mínimos quadrados que consiste em minimizar a seguinte função:

$$S = \sum_{i=0}^{N} (y_i - \varphi_i \cdot \theta)^2 \quad (3.10)$$

A sua representação matricial é

$$S = (Y - \Phi \cdot \theta)^T - (Y - \Phi \cdot \theta) \quad (3.11)$$

Segundo Moreira et al. (2002), pode ser encontrada uma solução única para o mínimo de S, se $(\Phi \cdot \Phi^{\mathrm{T}})$ for invertível. Assim, os parâmetros podem ser estimados pela equação 3.11 (figura 3.7).

$$\hat{\theta} = (\Phi \cdot \Phi^{\mathrm{T}})^{-1} \cdot \Phi^{\mathrm{T}} \cdot \mathrm{Y} \quad (3.11)$$

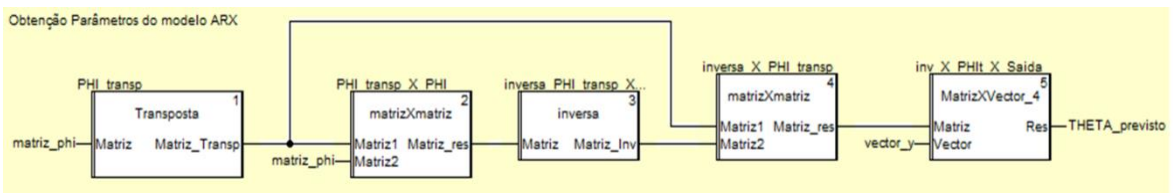

Figura 3.7: Estimação de parâmetros – implementação em FBD.

A partir da equação 3.12 é possível chegar a uma equação que relaciona o ganho estático com os parâmetros estimados.

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \cdots + b_{n_b} u(k-n_b) \quad (3.12)$$

$$\xrightarrow{T.Z}$$

$$Y(Z) + a_1 Z^{-1} Y(Z) + \cdots + a_{n_a} Z^{-n_a} Y(Z) = b_0 U(Z) + b_1 Z^{-1} U(Z) + \cdots + b_{n_b} Z^{-n_b} U(Z) \quad (3.13)$$

$$Y(Z)(1 + a_1 Z^{-1} + \cdots + a_{n_a} Z^{-n_a}) = U(Z)(b_0 + b_1 Z^{-1} + \cdots + b_{n_b} Z^{-n_b}) \quad (3.14)$$

O valor do ganho estático é dado por

$$SG(Z) = \frac{Y(Z)}{U(Z)} = \frac{(b_1 Z^{-1} + \cdots + b_{n_b} Z^{-n_b})}{(1 + a_1 Z^{-1} + \cdots + a_{n_a} Z^{-n_a})} \quad (3.15)$$

$$SG(z=1) = \frac{b_1 + \cdots + b_{n_b}}{1 + a_1 + \cdots + a_{n_a}} \quad (3.16)$$

Os parâmetros estimados em linha são utilizados na obtenção do ganho estático (*static gain*), o qual será comparado com o ganho estático do modelo guardado na base de conhecimento. A base de conhecimento contém a informação referente a cada um dos modelos, sendo o sistema de supervisão responsável por indicar qual o modo de funcionamento, e portanto, qual o modelo que deve ser considerado em cada instante. É feita uma verificação, e se o valor do resíduo da comparação dos dois valores passar um threshold previamente definido, é activado um alarme indicador de presença de falhas.

Observadores de Luenberger

Representado o sistema sob a forma de espaço de estados, obtem-se:

$$\begin{cases} x(k+1) = A\,x(k) + B\,u(k) \\ y(k) = C\,x(k) \end{cases} \quad (3.17)$$

Assumindo que as matrizes A, B e C são conhecidas, pode ser utilizado um observador para reconstruir as variáveis do sistema, com base nos sinais medidos de entrada u(k) e de saída y(k).

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\,\hat{x}(k) + B\,u(k) + He(k) \\ e(k) = y(k) - C\,\hat{x}(k) \end{cases} \quad (3.18)$$

onde *e(k)* é o erro do modelo (Figura 3.8).

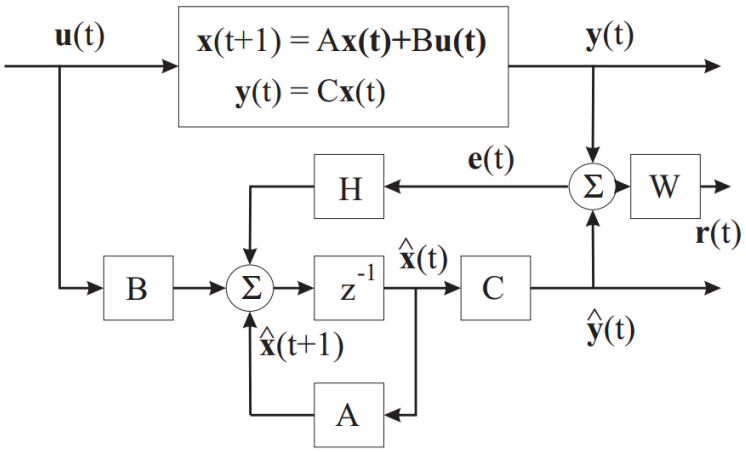

Figura 3.8: Observador de estado.

Para o erro de estimação, resulta da equação 3.18 que:

$$\begin{cases} e_x(k) = x(k) - \hat{x}(k) \\ e_x(k+1) = (A - HC)e(k) \end{cases} \tag{3.19}$$

Considerando que o sistema é influenciado por perturbações e falhas, o sistema passa a ser descrito pelo modelo:

$$\begin{cases} x(k+1) = A\,x(k) + B\,u(k) + Qv(k) + L_1 f(k) \\ y(k) = C\,x(k) + Rw(k) + L_2 f(k) \end{cases} \tag{3.20}$$

onde *v(k)* é o vector de perturbações na entrada, *w(k)*, o vector de perturbações nas saídas, *f(k)* os sinais de falha na entrada e na saída com factores L_1 e L_2, respectivamente. Estes podem representar falhas aditivas no actuador, no processo ou nos sensores.

Para o calculo do erro de estimação, utiliza-se a seguinte equação, considerando as perturbações *v(k) = 0* e *w(k) = 0*

$$x(k+1) = (A - HC)x(k) + L_1 f(k) - HL_2 f(k) \tag{3.21}$$

e portanto

$$e(k) = Ce_x(k) + L_2 f(k) \tag{3.22}$$

O vector *f(k)* representa falhas aditivas, porque estas influenciam *e(k)* e *x(k)* de forma aditiva. No caso de sinais de falha permanentes *f(k)*, o erro da estimativa do estado vai desviar de zero. Os sinais $e_x(k)$ e *e(k)* mostram comportamentos dinâmicos diferentes de L_1 *f(k)* e L_2 *f(k)*. Tanto $e_x(k)$ como *e(k)* podem ser considerados resíduos e podem ser utilizados na detecção de falhas.

Equações de Paridade

Um método simples de detecção de falhas baseada em modelos é ter um modelo $\frac{\hat{A}(s)}{\hat{B}(s)}$ e correr em paralelo com o processo $\frac{A(s)}{B(s)}$, obtendo um resíduo dado por:

$$r(s) = \left(\frac{A(s)}{B(s)} - \frac{\hat{A}(s)}{\hat{B}(s)}\right) u(s) \tag{3.23}$$

A metodologia descrita é ilustrada na Figura 3.9.

No entanto, tal como nos observadores, os parâmetros do modelo do processo devem ser conhecidos a priori. Se $\frac{A(s)}{B(s)} = \frac{\hat{A}(s)}{\hat{B}(s)}$, o resíduo resultante de falhas aditivas na entrada e saída do processo é dado por:

$$r(s) = \frac{A(s)}{B(s)}\, f_u(s) + f_y(s) \tag{3.24}$$

ou, gerando um erro polinomial (Figura 3.9b)

$$r(s) = \hat{A}(s)y(s) \; - \; B(s)u(s) \; = \; B(s)f_u(s) + A(s)f_y(s) \tag{3.25}$$

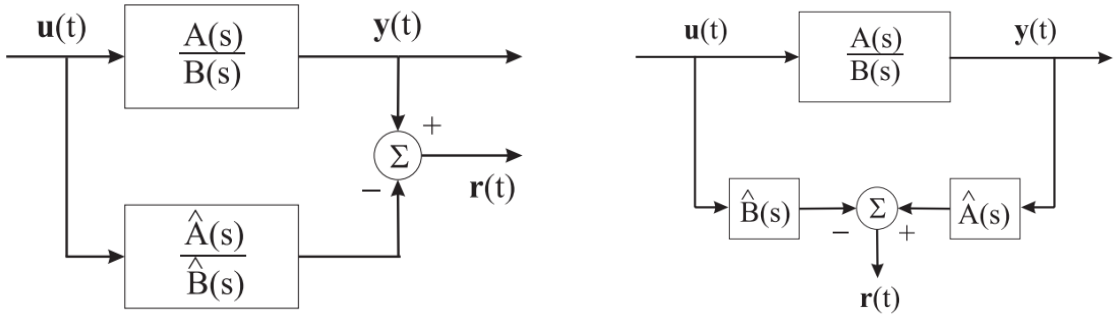

Figura 3.9: a) Erro de saída; b) Erro da equação

No entanto, para os sistemas SISO, só é possível obter um único resíduo e, portanto, não é fácil de distinguir entre as diferentes falhas.

Pode ser alcançada maior liberdade na concepção das equações de paridade se for possível medir sinais intermédios nos sistemas SISO. Assim, é utilizado um modelo de espaço de estados dado pela equação (3.17).

Substituindo na equação (3.17) a segunda equação na primeira, e atrasando várias vezes, obtem-se o seguinte sistema

$$\begin{bmatrix} y(t) \\ y(t+1) \\ y(t+2) \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots \\ CB & 0 & 0 & \cdots \\ CAB & CB & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ u(t+1) \\ u(t+2) \\ \vdots \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

$$Y_f(t) = T\,x(t) + QU_f(t) \tag{3.25}$$

Para eliminar os estados *x(t)* que não se podem medir, a equação (3.25) é multiplicada por *W*, de forma a que $W \cdot T = 0$. Assim, obtem-se

$$r(t) = WY_f(t) - WQU_f(t) \tag{3.26}$$

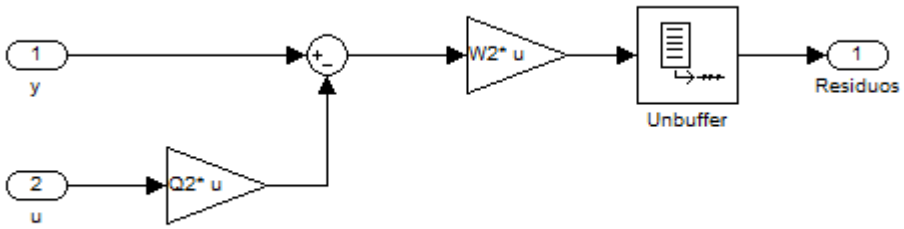

Figura 3.10:Diagrama da aplicação das equações de paridade.

Os vectores filtrados de entrada e saída U_f e Y_f são obtidos ao atrasar os sinais correspondentes *u* e *y*. A concepção da matriz W permite gerar um conjunto estruturado de resíduos.

3.2.2. Diagnóstico de Falhas

O módulo de diagnóstico de falhas, como referido anteriormente, é responsável pela classificação e identificação das falhas e do seu grau de severidade. O mecanismo de diagnóstico de falhas proposto consiste na aplicação de Lógica Difusa (Fuzzy Logic), recorrendo a diversas características dos sinais analisados, para aferir, por exemplo, se a falha é abrupta ou incipiente ou se é temporária ou permanente, bem como a severidade desta.

As falhas podem ser classificadas de diversas maneiras. Uma falha paramétrica é o desvio de um parâmetro do sistema no tempo, ou devido às condições ambientais, que o levam a assumir um valor diferente do nominal. Quando se observa um desvio grande e repentino do valor esperado do parâmetro tem-se uma falha estrutural. Estas falhas referem-se a mudanças na própria estrutura do sistema. São exemplos de falhas estruturais curto-circuitos ou circuitos abertos em circuitos electrónicos, e válvulas bloqueadas ou fugas em tanques e tubagens.

A maneira pela qual as falhas ocorrem também pode ser classificada. Chama-se falha simples aquela que atinge apenas um componente do sistema, enquanto que as falhas múltiplas atingem vários parâmetros ou componentes em simultâneo. Diz-se que duas falhas são independentes se não houver qualquer relação de causa e efeito entre elas, enquanto que as dependentes têm essa relação. No que se refere a sua estabilidade no tempo, uma falha é dita permanente quando ocorre de forma definitiva, sem a possibilidade de reparo, e é chamada de intermitente quando ocorre de forma temporária.

Lógica Difusa

A incorporação da Lógica Difusa em modelos computacionais é especialmente útil em duas situações: primeira, no caso de sistemas complexos, onde a compreensão do processo em questão, está praticamente limitada ao julgamento pessoal. Segunda, em processos onde o raciocínio, a percepção e o processo de decisão humano estão envolvidos intrinsecamente.

Estas características fazem com que a Lógica Difusa seja bastante adequada para o diagnóstico de falhas. É utilizada tipicamente na obtenção de modelos do sistema e na análise de resíduos.

A utilização mais comum da Lógica Difusa na área do diagnóstico de falhas tem sido na avaliação de resíduos. A avaliação de resíduos normalmente necessita de algum tipo de inferência, onde a conclusão de que uma falha ocorreu no sistema pode se basear, não só na informação contida nos resíduos, mas também em informações que são difíceis de codificar em modelos matemáticos tradicionais, tais como registos de manutenção ou a experiência do operador.

A análise de resíduos empregando regras difusas utiliza a ideia de que cada resíduo pode ser zero, negativo ou positivo, com um certo grau de pertinência, e que um sistema de inferência pode ser usado para determinar o grau de presença de uma determinada falha no sistema, ou para determinar o grau de severidade de uma falha presente no sistema. As regras difusas indicam as condições nas quais as falhas existem e também indicam as condições nas quais não há falhas.

Variáveis Linguísticas e Termos Linguísticos: As variáveis linguísticas tomam valores qualitativos sob a forma de adjectivos ou expressões numa linguagem natural ou artificial. Os termos linguísticos representam possíveis valores difusos das variáveis linguísticas: {Baixo; Médio; Alto}.

Funções de Pertença: A função de pertença estabelece uma relação entre conjuntos difusos, associados a cada termo linguístico (e.g. {Baixo; Médio; Alto}) e universo do discurso (Figura 3.11).

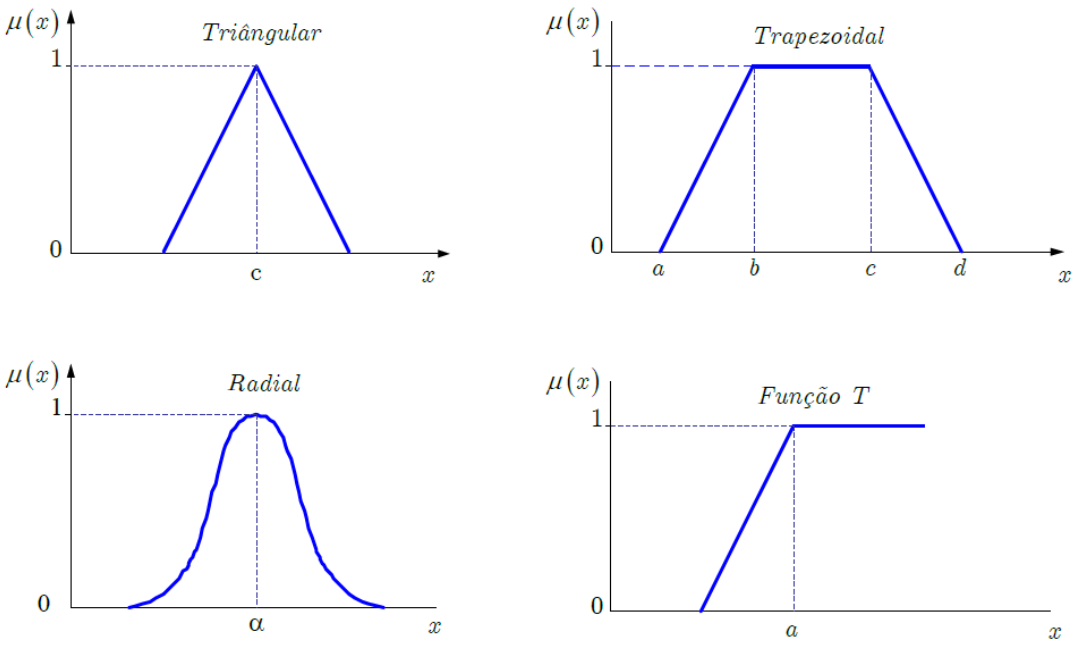

Figura 3.11:Funções de Pertença.

Operações sobre Conjuntos Difusos: As operações realizadas sobre conjuntos difusos assentam em três operadores: Intersecção ou conjunção; união ou disjunção e complemento.

Base de Regras "If ...Then...": Existem dois tipos principais de regras difusas, nomeadamente, regras difusas de Mamdani e regras difusas de Takagi-Sugeno. Começando com um exemplo simples de uma regra de Mamdani que descreve o movimento de um carro:

Se *Velocidade é Elevada* ***e*** *Aceleração Reduzida* ***então*** *Travagem é Média*

onde "Velocidade" e "Aceleração" são variáveis de entrada e "Travagem" é uma variável de saída. "Elevada", "Reduzida" e "Média são conjuntos difusos de entrada e de saída.

As variáveis e os termos linguísticos, tal como "Elevada", podem ser expressados sob a forma de símbolos matemáticos. Desta forma, a regra de Mamdani constituida por três variáveis de entrada e por duas variáveis de saída pode ser descrita por:

Se x_1 ***for*** M_1 ***e*** x_2 ***for*** M_2 ***e*** x_3 ***for*** M_3 ***então*** u_1 ***é*** M_4***;*** u_2 ***é*** M_5

onde x_1, x_2, e x_3 são variáveis de entrada (vg. resíduos, variação dos resíduos,etc.), e u_1 e u_2 variáveis de saída (vg. identificação da falha).

A abordagem proposta para a identificação das falhas é feita através da análise dos resíduos e da sua variação. Em seguida são apresentadas as funções de pertença consideradas para os resíduos e para a sua variação.

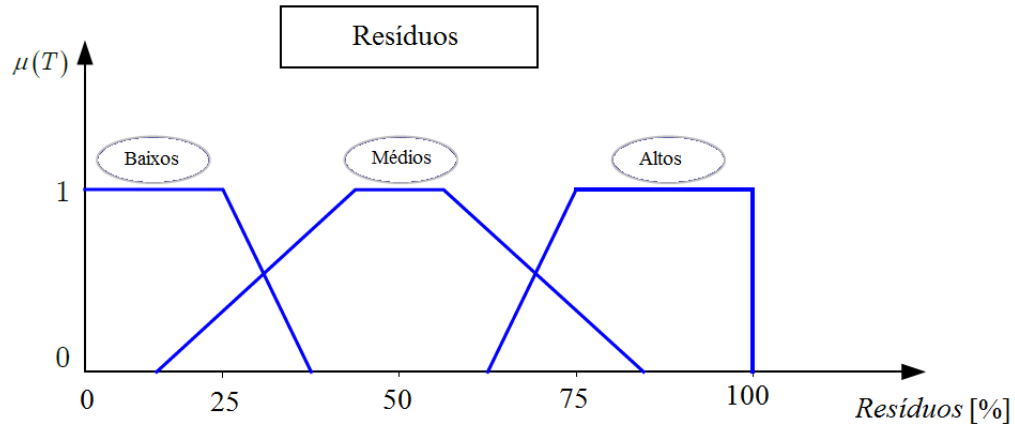

Figura 3.12:Função de Pertença para os Resíduos.

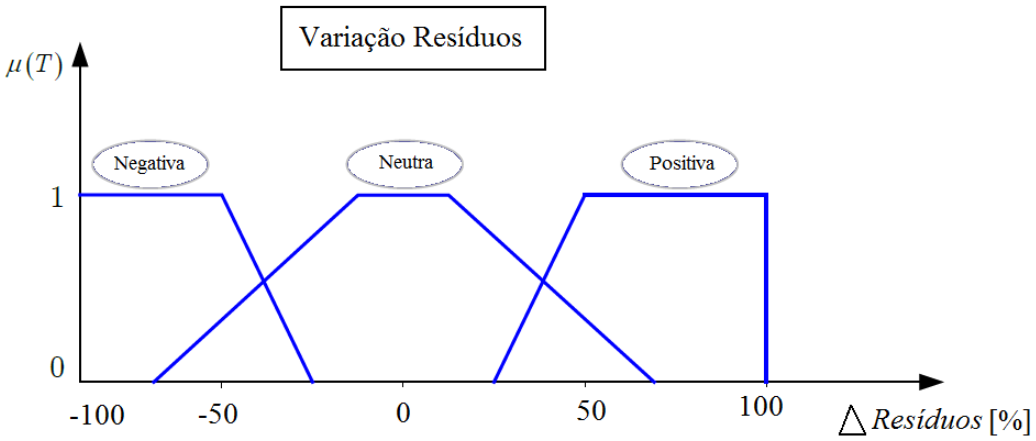

Figura 3.13: Função de Pertença para a variação dos Resíduos.

Após a fusificação dos valores dos resíduos e da variação dos resíduos, procede-se à inferência de várias regras com vista a aferição da identificação das falhas.

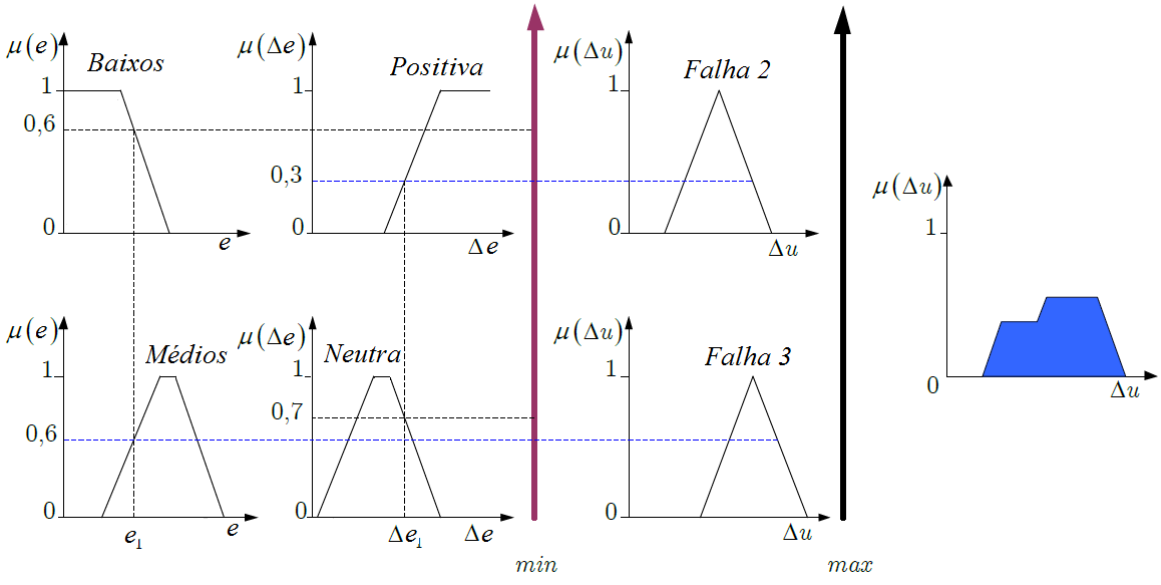

Figura 3.14: Inferência com múltiplas regras.

Finalmente, através de um processo de desdifusificação, o qual pode ser executado considerando diferentes métodos, realiza a conversão dos conjuntos difusos em valores reais.

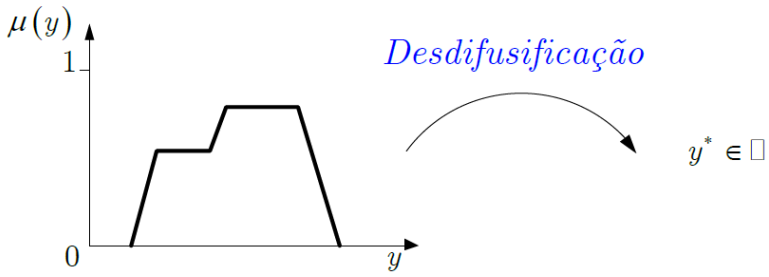

Figura 3.15: Desdifusificação de conjuntos difusos.

Os métodos de desdifusificação mais comuns são:

1. método do centro da área;
2. método da altura;
3. método da média dos máximos.

O método utilizado na abordagem proposta é o método das alturas e é dado por:

$$y^* = \frac{\sum_k c_k \cdot f_k}{\sum_k f_k} \tag{3.27}$$

Após a desdifusificação, a falha encontra-se identificada e esta informação é passada ao supervisor para que sejam tomadas medidas que contrariem a continuidade do estado de falha.

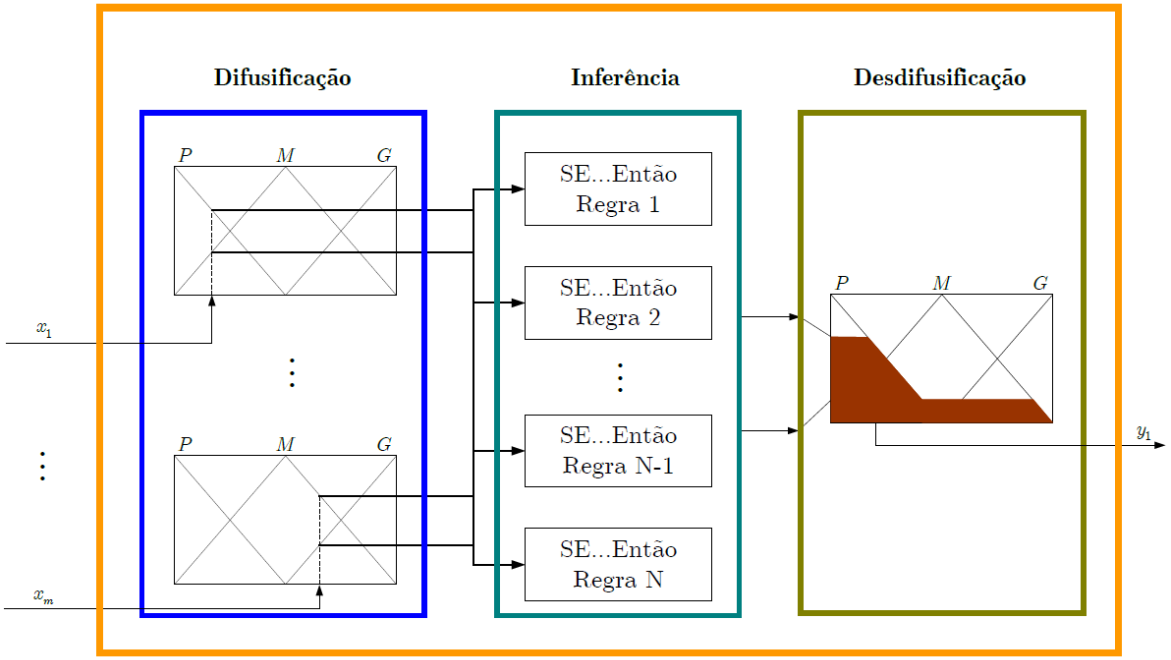

Figura 3.16: Arquitectura de um sistema de lógica difusa.

3.2.3. Supervisor

O módulo do Supervisor, tal como referido anteriormente, é responsável por identificar o modo de funcionamento do sistema, comunicar com o controlador e com o operador humano.

Este módulo foi desenvolvido de uma forma semelhante ao sistema de FDD, embora com recurso a regras de inferência mais simples, uma vez esta ser uma metodologia com capacidades apropriadas para as tarefas designadas ao Supervisor.

Inferência, tal como referido anteriormente, é o processo pelo qual se chega a uma proposição, com base em uma ou mais proposições aceites. Aos argumentos dão-se o nome de premissas e ao valor final o de conclusão. As conclusões são obtidas a partir das premissas. As regras de inferência têm as seguintes características: Se a Hipótese for verdadeira, então a Conclusão é verdadeira; Se E1 e E2 preenchem certas condições, então E3 tem uma certa característica .

Inicia-se com um sistema simplificado de regras ao qual se adicionam novas regras gradualmente.

Alguns exemplos de regras de inferência são apresentados a seguir:

Se *Valor_Referência_Minimo < Valor_Referência < Valor_Referência_Máximo* ***então***
Valor_Referência_Validada := Valor_Referência;

Se *ID_Falha = 3* ***e*** *Severidade_Falha > 0.5* ***então***
Reconfigurar_Sistema_Controlo := TRUE;
Modo_Funcionamento := 5;
Aviso_Falha_Operador:="Fuga Tanque 1 nível 3"

O supervisor utiliza a informação adquirida anteriormente para a tomada de decisões, tais como a reconfiguração do sistema de controlo, quando existem falhas com um grau de severidade elevado, ou a paragem do sistema em segurança, no caso da falha ser irrecuperável e colocar em risco a integridade da instalação.

O módulo supervisor é, no fundo, e como o próprio nome indica, um módulo responsável por monitorizar o estado de funcionamento do sistema, validar valores de referências, decidir sobre reconfigurações do sistema de controlo e ainda fornecer informação ao Supervisor Humano. Assim, não necessita de algoritmos muito complexos para desempenhar a sua função. Esta abordagem é de fácil implementação e de rápida execução, não ocupando muita capacidade de processamento do CPU dos PLCs.

4. Resultados Experimentais

Para avaliar o desempenho do sistema de supervisão proposto, são apresentados, neste capítulo, os resultados da aplicação da arquitectura e das metodologias propostas ao processo "Dois Tanques", instalado no laboratório de automação do DEE. Este processo apresenta duas saídas mensuráveis, correspondentes aos níveis de água de cada tanque, e uma entrada que permite actuar uma bomba de água que regula o caudal na instalação.

Na secção 4.1 é aplicada ao caso de estudo a arquitectura proposta no capítulo anterior, e é feita uma descrição de cada um dos três níveis que a compõem - nível de processo, nível de execução e nível de supervisão.

Nas secções 4.2 e 4.3 são apresentadas as metodologias estudadas no capítulo anterior e a implementação dos sistemas de FDD e de supervisão propostos. Os algoritmos de supervisão e de controlo foram implementados em PLCs distintos, sendo a comunicação entre os dois dispositivos efectuada através de uma rede Ethernet, utilizando o protocolo TCP/IP. O controlador não foi desenvolvido neste trabalho, uma vez tratar-se do tema de outra dissertação desenvolvida paralelamente a esta.

Na secção 4.4 são apresentados os resultados obtidos e é feita uma avaliação do comportamento do sistema de supervisão na presença dos diversos tipos de falhas.

Por fim, é feita, na secção 4.5, uma análise dos resultados com base nos objectivos propostos para este caso de estudo e são retiradas algumas conclusões.

4.1. Arquitectura

A implemetação prática da arquitectura proposta no capítulo 3 (figura 3.1) pressupõe a existência de uma comunicação entre os diferentes níveis, que permita a troca de informação entre o supervisor e o controlador, e também entre o controlador e o processo. A troca de informação entre o supervisor e o controlador é feita através de uma rede Ethernet, utilizando o protocolo TCP/IP. Entre o controlador e o processo existe alguma electrónica auxiliar, desenvolvida para permitir que os sinais provenientes dos sensores sejam convertidos para sinais mensuráveis pelos PLCs. Esta electrónica encontra-se descrita no anexo A.

A aplicação da arquitectura, proposta no capítulo anterior, ao caso de estudo considerado é apresentada na figura 4.1.

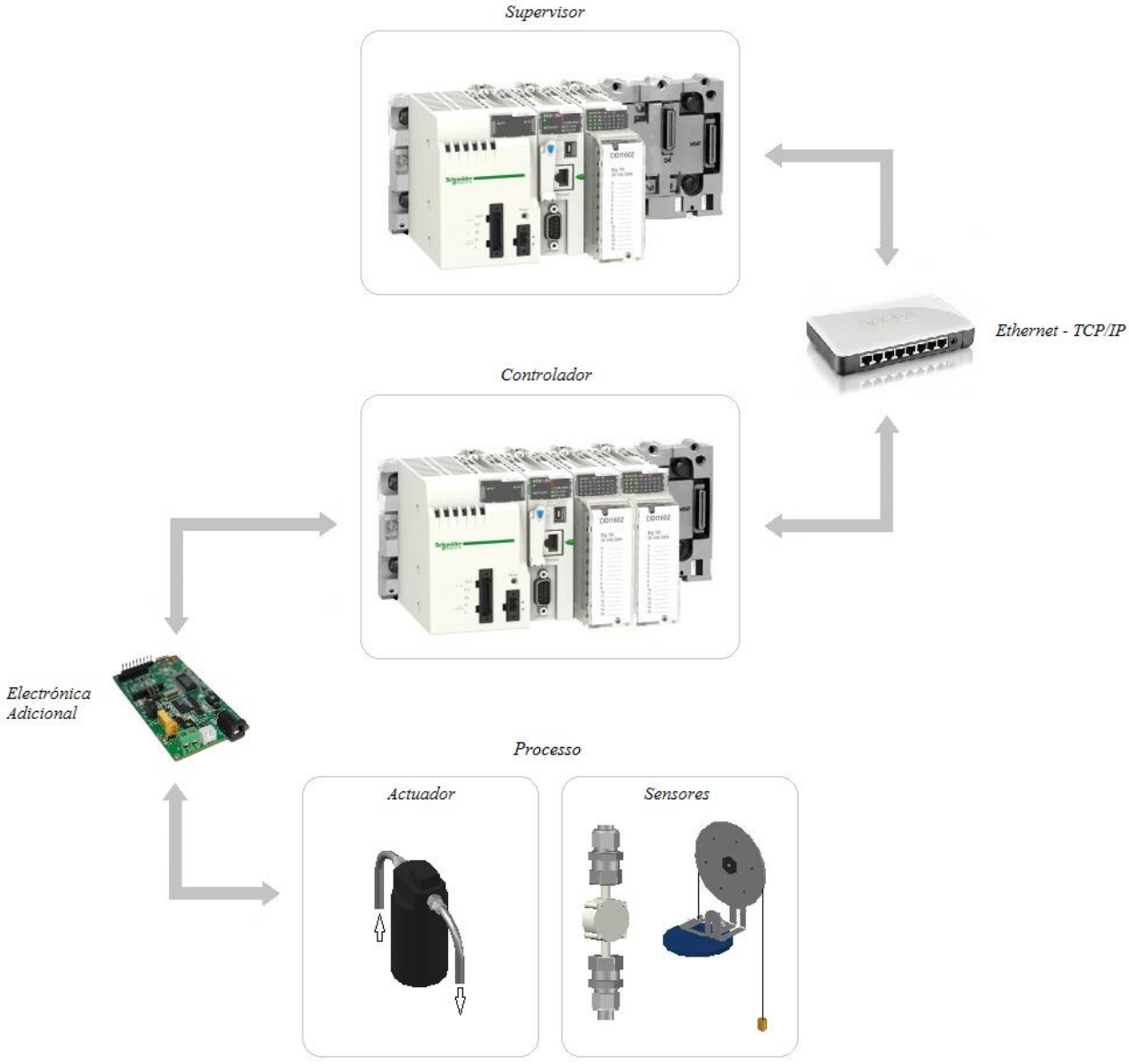

Figura 4.1: Arquitectura do sistema implementado.

4.1.1. Nível de Processo

O caso de estudo baseia-se num processo com características muito próximas das dos sistemas a operar actualmente na indústria, embora estes últimos tenham uma maior complexidade, o que demonstra também a aplicabilidade das arquitecturas e metodologias propostas.

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).

O processo é um sistema SISO, em que o sinal de entrada do sistema actua uma bomba DC, que é responsável por transferir água de um reservatório para o primeiro tanque, e a saída do sistema é obtida a partir de um sensor de caudal situado à saída do segundo tanque.

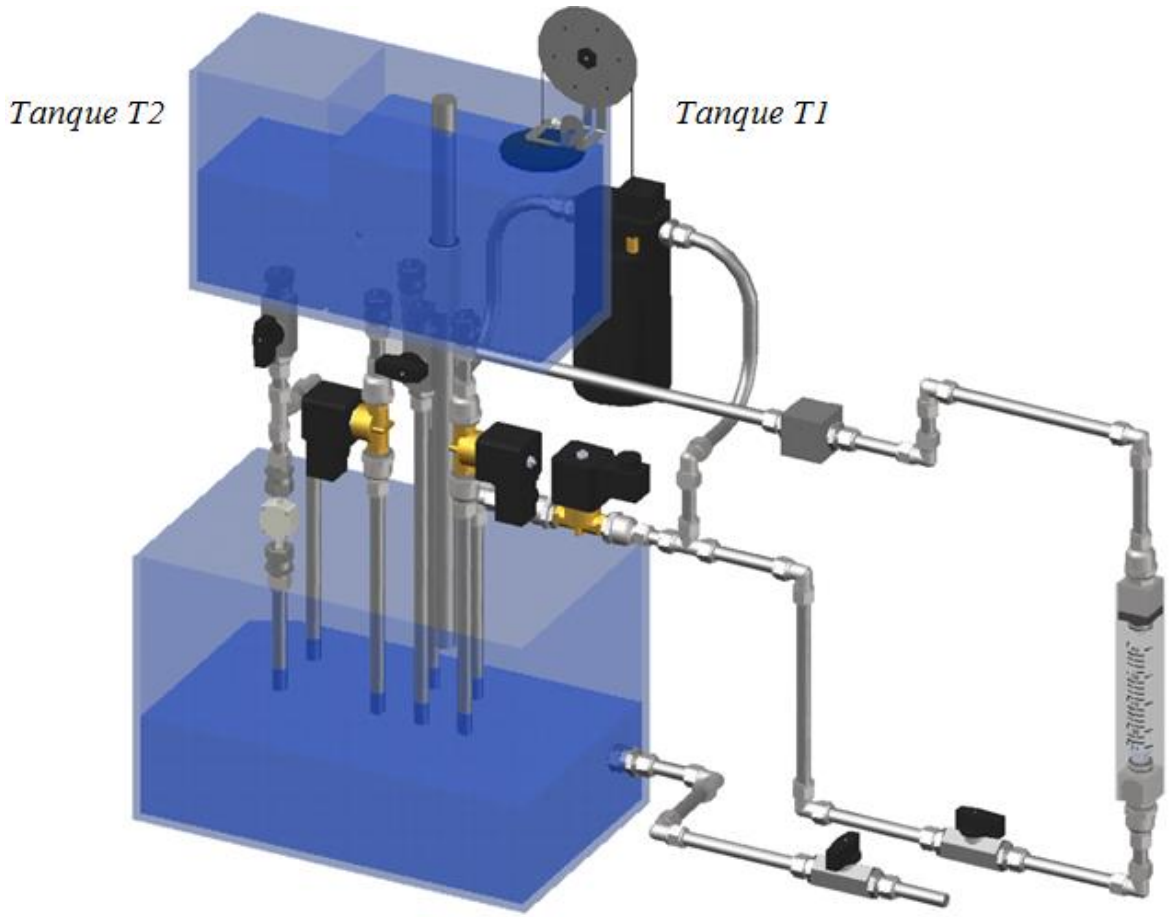

Figura 4.2: Processo laboratorial “Dois Tanques” (FBK 38-100).

A instalação ilustrada no diagrama da Figura 4.3 (correspondente à imagem apresentada na Figura 4.2), é constituída essencialmente pelos seguintes componentes:

i) Dois tanques acoplados, denominados T_1 e T_2;

ii) Uma bomba P_1 que assegura a alimentação directa do tanque T_1 a partir do reservatório;

iii) Um sensor de nível instalado no tanque T_1;

iv) Um medidor de caudal (S_1) instalado à saída do tanque T_2;

v) Tubagens que ligam cada um dos dois tanques ao reservatório, dotadas de válvulas junto à base dos tanques (mv_1, sv_1, mv_2 e sv_2).

vi) Uma electroválvula (sv_3) que possibilita o retorno do fluído directamente da saída da bomba P_1 ao reservatório T_0;

vii) Uma válvula controlada por servomotor (sv_4) que permite reduzir o fluxo à entrada do tanque T_1.

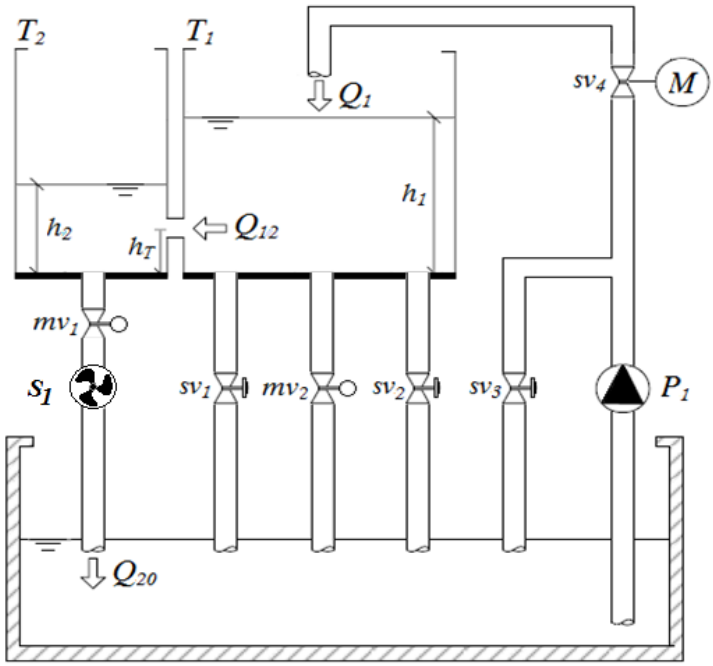

Figura 4.3: Representação esquemática do processo dos "Dois Tanques".

O principal objectivo do processo passa por garantir um determinado caudal de água (Q_{20}) na saída do tanque T_2. Para que este objectivo seja atingido, o nível de água no tanque T_2 (h_2), deve ser mantido num valor de referência correspondente ao valor desejado para o caudal Q_{20}. Na situação nominal, o tanque T_1 é abastecido pela bomba P_1 com um caudal Q_1, passando a água em seguida para o tanque T_2, através da força da gravidade. Facilmente se conclui que o nível do tanque T_2 só pode ser controlado de uma forma indirecta, ou seja, através do tanque T_1. O fluxo entre os tanques T_1 e T_2 é realizado através de uma tubo situado na parede que os separa, o que implica a existência de diversas dinâmicas não lineares, descritas na próxima secção.

Actuadores e Sensores

No processo laboratorial "Dois Tanques", a interface é efectuada através de um sensor de caudal, um sensor de nível e de um actuador associado à bomba de alimentação do tanque T_1 e às electroválvulas existentes nas diversas tubagens.

O sensor de caudal (Figura 4.4a) é constituído por uma pequena turbina cuja velocidade depende do fluxo que a atravessa. O sensor devolve um sinal pulsado cuja frequência é proporcional à velocidade angular da turbina e, por conseguinte, ao fluxo que a atravessa. Este sinal é posteriormente convertido, através de um hardware desenvolvido para essa finalidade, em tensão contínua e enviado para o PLC. Atraves da configuração dos canais de aquisição de dados do autómato, os sinais de saída do processo são processados por um filtro passa-baixo de ordem 6, de forma a atenuar o ruído eléctrico proveniente dos sensores e dos circuitos electronicos auxiliares. Os erros de medição que ocorrem neste sensor têm origem em não linearidades dos componentes electrónicos anexos e em impurezas que obstruam o sensor.

O sensor de nível (Figura 4.4b), situado no tanque T_1, é constituído por uma roldana à qual está ligada uma boia que se desloca verticalmente, seguindo o nível da água no tanque. Acoplado à roldana encontra-se um potenciómetro onde, para diferentes alturas, são verificadas diferentes valores de impedância nos seus terminais. Os valores de impedância medidos são convertidos para tensão contínua, através de alguma electrónica desenvolvida para o efeito, e enviados para o PLC.

a) b)

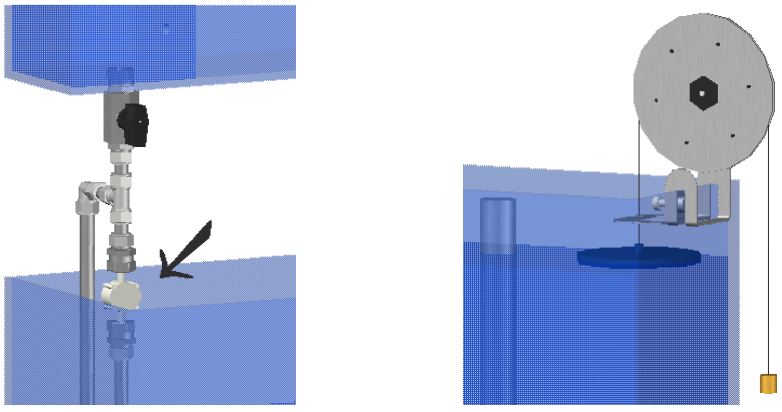

Figura 4.4: a) Sensor de caudal; b) Sensor de nível.

Os métodos de calibração e as curvas de calibração obtidas para ambos os sensores são apresentados no Anexo B.

A bomba utilizada na alimentação ao tanque T_1 é actuada por um motor de corrente contínua (DC). O motor recebe um sinal eléctrico em tensão numa gama entre 0 e 5V, actuando sobre a bomba de forma a garantir uma variação do caudal debitado entre 0 e 4 L/min (0V corresponde a $0m^3/s$ e 5V corresponde a $6{,}67\times10^{-5}m^3/s$).

4.1.2. Nível de Supervisão

Os algoritmos de FDD e de supervisão, descritos no terceiro capítulo, foram implementados no PLC ilustrado na figura 4.5. O PLC é constituido pelos módulos: fonte de alimentação, CPU e actuação e aquisição de dados, instalados num rack com capacidade para quatro módulos (para além da fonte de alimentação), modelo BMX XBP 0400.

Figura 4.5: PLC Supervisor

1. Módulo de alimentação, responsável pelo fornecimento de energia a todos os dispositivos instalados no rack (BMX CPS 2000).

2.Módulo central de processamento (CPU), no qual é executado o sistema de FDD e de supervisão (BMX P34 2030). O programa a ser executado encontra-se guardado em memória neste módulo.

Este componente dispõe de uma porta de comunicação Ethernet, através da qual comunica com o PLC controlador. Adicionalmente, possui uma porta para comunicação, com protocolo CANOpen, mas esta não é utilizada neste trabalho.

3. Módulo de aquisição e actuação digital com oito entradas e oito saídas (BMX DDM 16022). Este dispositivo foi instalado com vista a trabalhos futuros, não tendo aplicabilidade neste caso de estudo.

4.1.3. Nível de Execução

O algoritmo de controlo, não desenvolvido nesta dissertação, foi implementado no PLC ilustrado na figura 4.6, composto pelos módulos utilizados no PLC supervisor e por um módulo de aquisição e actuação analógico (BMX AMM 0600). Este módulo é utilizado para receber e enviar sinais analógicos para o nível de processo. Este módulo permite tratar sinais analógicos cuja grandeza pode ser dada em corrente ou em tensão.

Figura 4.6: PLC Controlador

Módulo de aquisição e actuação analógico, com quatro entradas, duas delas utilizadas para a aquisição dos valores de y_1 e y_2, e duas saídas, sendo uma delas utilizada para actuar a bomba de água (BMX AMM 0600). As caracteristicas técnicas deste módulo são descritas no anexo C.

4.2. Metodologia

Do ponto de vista teórico, o caso de estudo representa um sistema com uma dinâmica não linear. As não linearidades resultam do facto do caudal volúmico de água entre tanques estar relacionado com a raiz quadrada da diferença dos níveis de água nos tanques. Outra não linearidade advém do facto de a água passar entre os dois tanques através de um tubo a uma altura h_T da parede que os separa. Assim, devem considerar-se várias dinâmicas de funcionamento, que variam com os níveis de água dos tanques T_1 e T_2. Deste modo, o sistema apresenta quatro estados de funcionamento, representados nas figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10.

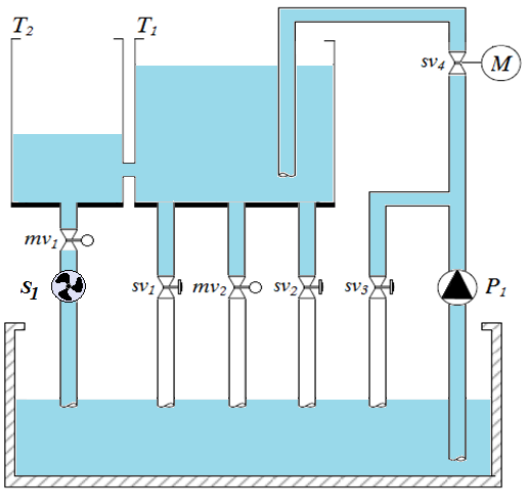

Figura 4.7: Estado 1: $y_1 > y_2 > h_T$

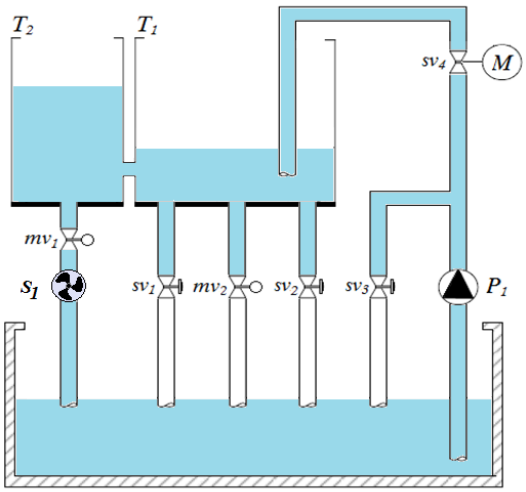

Figura 4.8: Estado 2: $h_T < y_1 < y_2$

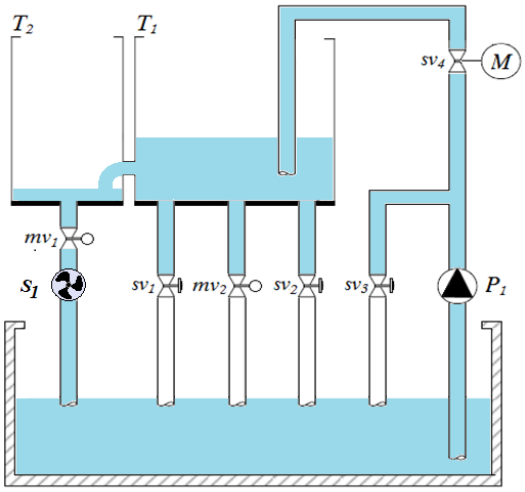

Figura 4.9: Estado 2: $y_1 > h_T > y_2$

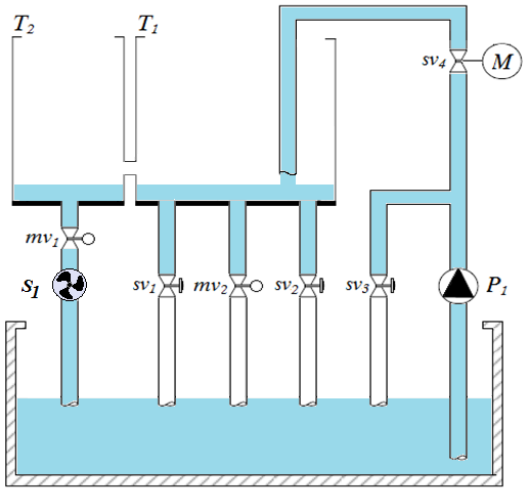

Figura 4.10: Estado 4: $y_1 < h_T$ e $y_2 < h_T$

Assumindo que o nível de água nos tanques T_i e T_j não é inferior à altura a que se encontra a tubagem de interligação entre esses tanques (figuras 4.7 e 4.8), o caudal volúmicoQ_{ij} [m^3/s] do líquido que flui entre esses tanques pode ser calculado através da lei de Torricelli de acordo com a expressão:

$$\boldsymbol{Q_{ij} = v_{ij} k_{ij} S_{ij} sgn(h_i - h_j)\sqrt{2g|h_i - h_j|}} \tag{4.1}$$

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} [m^2] a secção transversal da tubagem que liga os tanques T_i e T_j, $sgn(\cdot)$ a função sinal, g [m/s^2] a aceleração da gravidade e h_i, h_j [m] os níveis do líquido nos tanques T_i eT_j, respectivamente, cujo valor poderá variar entre h_T e h_{max}.

Aplicando a lei da conservação da massa, a variação do volume V_i [m^3] do líquido no tanque T_i pode ser obtido através da expressão:

$$\boldsymbol{\dot{V}_i = S_i \cdot \dot{h}_i = \sum Q_{in} - \sum Q_{out}} \tag{4.2}$$

onde S_i [m^2] representa a área da secção transversal do tanque T_i e $\sum Q_{in}$, $\sum Q_{out}$ a soma de todos os caudais volúmicos 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 dois tanques, dadas por:

$$\dot{\boldsymbol{h}}_{\boldsymbol{1}} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{S_1}} \cdot (\boldsymbol{Q_1} - \boldsymbol{Q_{12}} - \boldsymbol{Q_{1F1}} - \boldsymbol{Q_{1F2}} - \boldsymbol{Q_{1F3}}) \tag{4.3}$$

$$\dot{\boldsymbol{h}}_{\boldsymbol{2}} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{S_2}} \cdot (\boldsymbol{Q_{12}} - \boldsymbol{Q_{20}}) \tag{4.4}$$

onde Q_{ij} [m^3/s] com i, j ∈ {0, 1, 2}, representam o caudal volúmico do fluido nas tubagens com as válvulas v_{ij}, Q_{1F} [m^3/s] representa o caudal volúmico do fluido nas tubagens com as válvulas sv_1, sv_2 ou mv_2 e Q_1 [m^3/s] o caudal volúmico gerado pela bomba P_1, cujo valor poderá variar entre 0 e $6{,}67\times10^{-5}$ m^3/s.

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:

$$\boldsymbol{Q_{12}} = \boldsymbol{k_{12} S_{12}\, sgn(h_1 - h_2)\sqrt{2g|h_1 - h_2|}} \tag{4.5}$$

$$\boldsymbol{Q_{20}} = \boldsymbol{mv_{20} k_{20} S_{20}\sqrt{2g h_2}} \tag{4.6}$$

$$\boldsymbol{Q_{1F1}} = \boldsymbol{sv_1 k_{1F1} S_{1F1}\sqrt{2g h_1}} \tag{4.7}$$

$$\boldsymbol{Q_{1F2}} = \boldsymbol{sv_2 k_{1F2} S_{1F2}\sqrt{2g h_1}} \tag{4.8}$$

$$\boldsymbol{Q_{1F3}} = \boldsymbol{mv_2 k_{1F3} S_{1F3}\sqrt{2g h_1}} \tag{4.9}$$

Admitindo que os níveis de água nos tanques são não nulos, os caudais indicados podem apresentar um valor nulo desde que a respectiva válvula se encontre na posição de fechada (coeficiente s*v* ou *mv* com o valor 0), ou no caso dos níveis do líquido nos dois tanques não serem, simultaneamente, superiores à altura da tubagem que liga os dois tanques h_T (figuras 4.9 e 4.10).

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores dos parâmetros que caracterizam o processo dos Dois Tanques.

Tabela 4.1: Valores dos parâmetros fundamentais do processo "Dois Tanques".

Parâmetro	Símbolo	Valor
Área da secção transversal tanque T_1	S_1	$2{,}86\times10^{-2}$ m^2
Área da secção transversal tanque T_2	S_2	$1{,}69\times10^{-2}$ m^2
Área da secção transversal das várias tubagens	S_{ij} $i, j \in \{0, 1, 2\}$	$1{,}13\times10^{-4}$ m^2
Aceleração da gravidade	g	9,81 m/s^2
Caudal volúmico máximo debitado pela bomba P_1	Q_{max}	$1{,}27\times10^{-4}$ m^3/s
Nível máximo do líquido nos tanques T_1 e T_2	h_{max}	$1{,}35\times10^{-1}$ m

Altura da tubagem que liga os tanques T_1 e T_2	h_T	$4{,}00\times10^{-2}$m

O sistema nominal é caracterizado por duas saídas mensuráveis: o nível de água no tanque T_1 (h_1) e o caudal à saída do tanque T_2 (Q_{20}), sujeitas a falhas (fs_1 e fs_2) e a ruído (n_1 e n_2, respectivamente), e por uma entrada controlável: o caudal de entrada fornecido pela bomba P_1 (Q_1) sujeita a falhas (f_a) e perturbações (p) e falhas em componentes do processo (f_c).

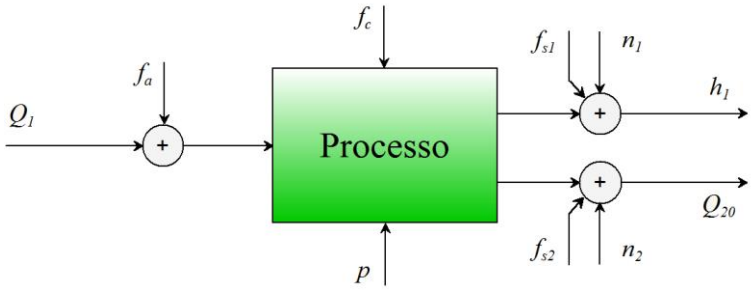

Figura 4.11: Diagrama de falhas e perturbações a que o processo está sujeito.

A existência das várias válvulas no processo possibilita o estabelecimento de diversas situações de falha como fugas nos tanques (usando as válvulas sv_1 e sv_2) ou nas tubagens (accionando a válvula sv_3) ou ainda obstruções nessas mesmas tubagens (utilizando a válvula sv_4 para reduzir a passagem de água). As falhas consideradas são ilustradas nas figuras 4.12 a 4.16.

Em cada tanque estão instaladas válvulas manuais (mv_1 e mv_2) que não serão consideradas para o caso de estudo, sendo apenas utilizadas para a manutenção do processo. Neste trabalho, a configuração nominal do processo considera as válvulas mv_1 e sv_4 totalmente abertas e as restantes válvulas completamente fechadas.

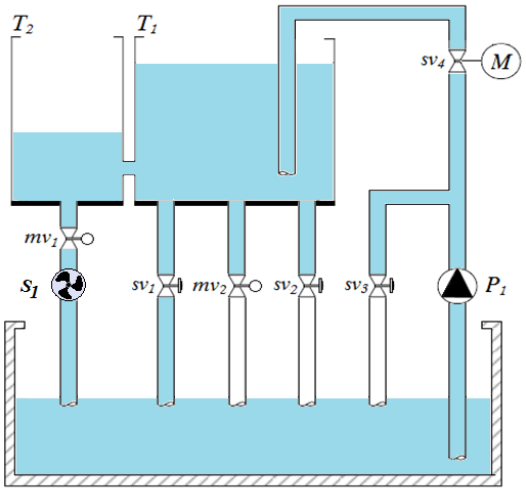

Figura 4.12: Falha 1: válvulas sv_1 abertas.

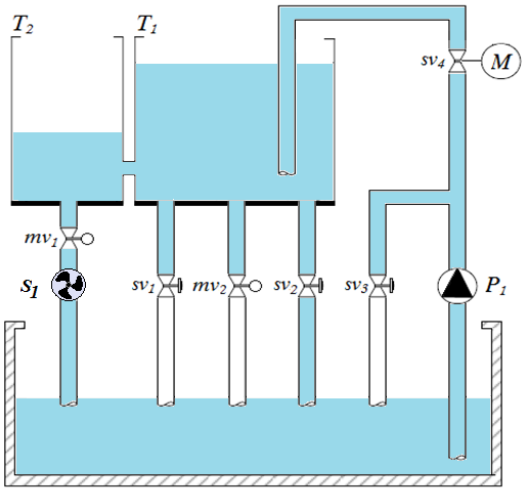

Figura 4.13: Falha 2: válvula sv_2 aberta.

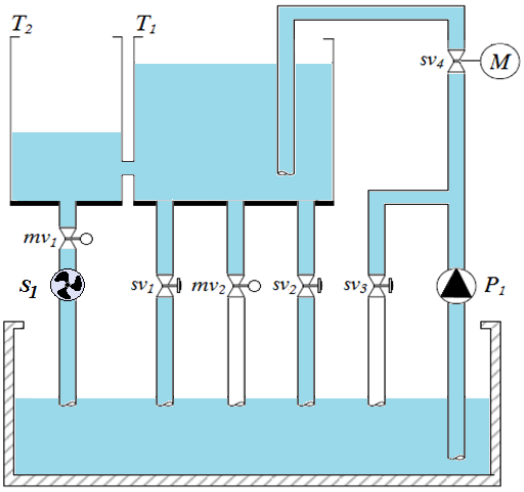

Figura 4.14: Falha 3: válvulas sv_1 e sv_2 abertas.

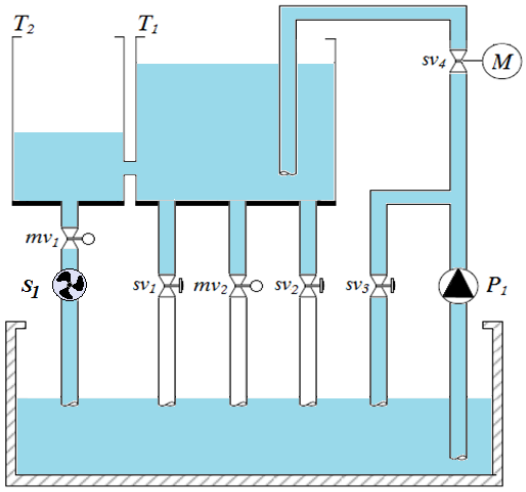

Figura 4.15: Falha 4: válvula sv_3 aberta.

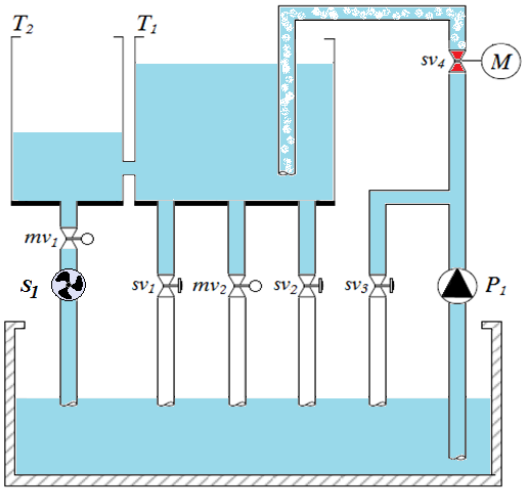

Figura 4.16: Falha 5: servo-válvula sv4 aberta a 50%.

Na tabela 4.2 encontram-se identificadas as falhas consideradas neste caso de estudo, bem como a resposta dada pelo sistema para resolver cada uma dessas falhas.

Tabela 4.2: Falhas consideradas no caso de estudo.

Id Falha	Descrição da falha	Proposta de Resposta do Sistema
F_1	Fuga no tanque 1 (sv_1)	Comutação de Controlador
F_2	Fuga no tanque 1 (sv_2)	Comutação de Controlador
F_3	Fuga no tanque 1 (sv_1 e sv_2)	Comutação de Controlador
F_4	Fuga na canalização (sv_3)	Comutação de Controlador
F_5	Estrangulamento da canalização (sv_4)	Comutação de Controlador
F_6	Falha no sensor caudal (S_1)	Reconfiguração (sensor virtual)
F_7	Falha no sensor nível (y_1)	Reconfiguração (sensor virtual)
F_8	Falha na bomba (P_1)	Reconfiguração (actuador virtual)

4.3. Implementação

Nesta secção é apresentada a implementação das abordagens propostas de FDD e de supervisão, utilizando o ambiente de programação Unity Pro.

4.3.1. Configuração de Hardware

A implementação do sistema de supervisão tem início na configuração do hardware utilizado. A definição dos módulos deve respeitar a ordem pela qual estes estão dispostos no rack, como ilustrado na figura 4.5.

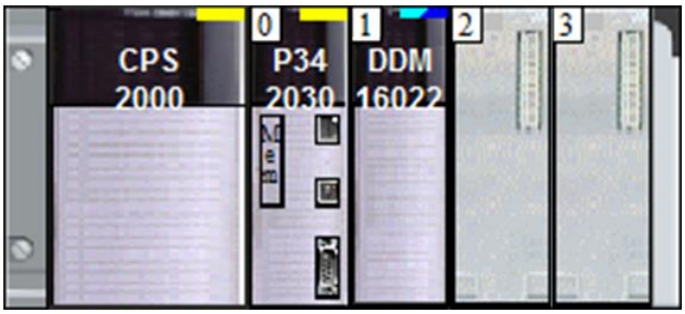

Figura 4.17: Fonte de alimentação; CPU[0]; Módulo digital [1]

4.3.2. Configurações de Rede

Os parâmetros de comunicação, necessários à troca de dados, entre os dispositivos controlador e supervisor, devem ser definidos de acordo com as caracteristicas da rede já instalada. A cada um dos dispositivos deverá ser atribuido um endereço de IP que o identifique nessa mesma rede.

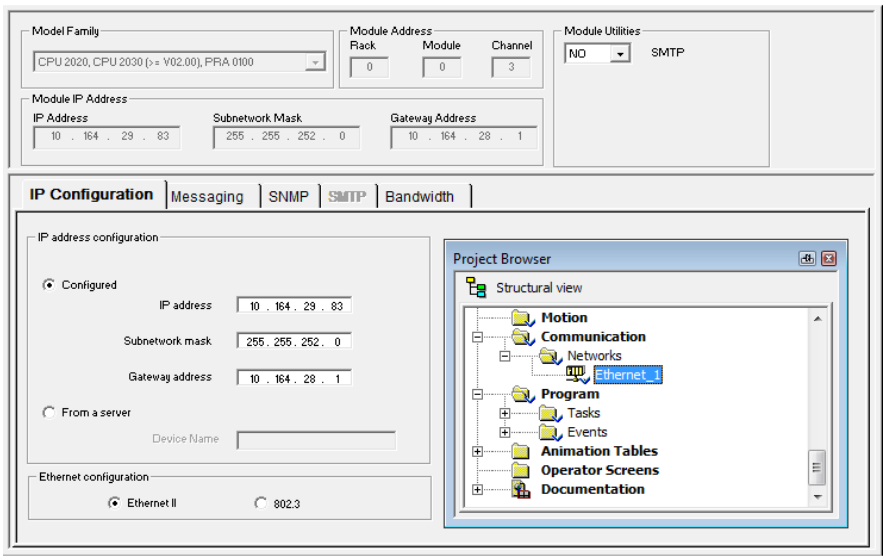

Figura 4.18: Definição dos parâmetros de rede

4.3.3. Definição de variáveis

Nesta secção são indicadas as variáveis necessárias ao funcionamento do sistema, nomeadamente variáveis destinadas à actuação e aquisição de dados, comunicação entre controlador e supervisor e os parâmetros dos sistemas de FDD e supervisão. A definição do endereço das variáveis respeita a seguinte sintaxe:

%Objecto Formato Rack.m.c

onde *Objecto* indica se se trata de uma variável de entrada de dados (I), saída de dados (Q), variável interna (M) ou constante interna (K) e *Formato* indica se a variável é do tipo boleano (X), word (W), double (D) ou floating point (F). *Rack* contém o endereço do rack, *m* a posição do módulo no rack e *c* o canal ao qual se pretende aceder.

Na tabela 4.3 são apresentadas as variáveis de entrada e saída do processo. Embora o PLC supervisor não tenha acesso directo às entradas e saídas do processo, uma vez que estas são obtidas pelo PLC controlador, a sua definição é importante e, tal como referido anteriormente, deve respeitar a posição no rack e ser de acordo com os canais aos quais foram conectados os sensores e actuadores.

Tabela 4.3: Variáveis de entrada e saida do módulo analógico do PLC Controlador.

Name	Type	Address	Value	Comment
I0	INT	%IW0.1.0		Input do módulo analógico (0).
I1	INT	%IW0.1.1		Input do módulo analógico (1).
O1	INT	%QW0.1.5		Output do módulo analógico (1).

O controlador deverá fornecer ao supervisor os valores obtidos dos sensores e o valor colocado no actuador (Tabela 4.4). Para acederem aos dados correctamente, é necessário que se defina a localização das variáveis, sendo essa informação um parâmetro essencial na transferência de dados entre PLCs.

Tabela 4.4: Variáveis recebidas do PLC Controlador.

Name	Type	Address	Value	Comment
	ARRAY[0..2] OF INT			Tabela de parâmetros a receber do Controlador
Tabela_Controlador_Rcb[0]	INT			Output do módulo analógico (1).
Tabela_Controlador_Rcb[1]	INT			Input do módulo analógico (0).
Tabela_Controlador_Rcb[2]	INT			Input do módulo analógico (1).

A tabela 4.5 contem as variáveis que o supervisor disponibiliza ao controlador. O supervisor deverá fornecer ao controlador o valor de referência para o nível do tanque 2. Em caso de falha no actuador ou nos sensores, o supervisor deverá enviar o valor do desvio verificado em y_1, y_2 e u em

relação ao ponto de funcionamento nominal. Para o caso de falha no processo, o supervisor deverá transmitir a informação relevante da falha.

Tabela 4.5: Variáveis disponibilizadas ao PLC Controlador.

Name	Type	Address	Value	Comment
Tabela_Controlador_Env	ARRAY[0..7] OF INT	%MW100		Tabela de parâmetros a enviar ao
Tabela_Controlador_Env[0]	INT	%MW100		Detecção de falha no actuador
Tabela_Controlador_Env[1]	INT	%MW101		Detecção de falha no sensor 1
Tabela_Controlador_Env[2]	INT	%MW102		Detecção de falha no sensor 2
Tabela_Controlador_Env[3]	INT	%MW103		Desvio do actuador
Tabela_Controlador_Env[4]	INT	%MW104		Desvio do sensor 1
Tabela_Controlador_Env[5]	INT	%MW105		Desvio do sensor 2
Tabela_Controlador_Env[6]	INT	%MW106		Identificação de falha no processo
Tabela_Controlador_Env[7]	INT	%MW107		Nível de referência para o tanque 2

As tabelas 4.6 e 4.7 contêm as variáveis utilizadas no sistema de FDD, mais especificamente, os valores das entradas e saídas do processo, dos resíduos obtidos na detecção de falhas, a sinalização de alarmes, a identificação da falha, a severidade da falha e os modos de funcionamento.

Tabela 4.6: Variáveis de entrada e saida do processo.

Name	Type	Address	Value	Comment
y1	REAL	%MW200		nível do tanque T1
y2	REAL	%MW201		nível do tanque T2
u	REAL	%MW202		acçao de controlo

Tabela 4.7: Variáveis principais do sistema de FDD.

Name	Type	Address	Value	Comment
res_ARX	REAL	%MW205		Resíduo Ganho Estático ARX
res_OBS	REAL	%MW206		Resíduo Observador
res_PEQ	REAL	%MW207		Resíduo Parity Equations
ALARME	BOOL	%MW208		Flag Alarme
ID_alarme	INT	%MW209		Identificação do Alarme
Sev_alarme	REAL	%MW210		Severidade do Alarme
Modo_Func	INT	%MW211		Modo de Funcionamento

Nas tabelas 4.7 e 4.8 são declaradas as estruturas dos modelos ARX e de Espaço de estados que são utilizadas para guardar os parâmetros dos modelos do processo. Esta estruturação torna-se muito útil na elaboração dos algoritmos de detecção de falhas.

Tabela 4.8: Estrutura de um modelo ARX.

Name	Type	Comment
ARX	<Struct>	
A	ARRAY[1..3] OF REAL	
B	REAL	
phi	ARRAY[1..4] OF REAL	
theta	ARRAY[1..4] OF REAL	[a1 a2 a3 b1]'

Tabela 4.9: Estrutura de um modelo de Espaço de Estados.

Name	Type	Comment
modelo_Espaco_Estados	<Struct>	
A	ARRAY[1..2,1..2] OF REAL	matriz da dinâmica
B	ARRAY[1..2] OF REAL	matriz de entrada
C	ARRAY[1..2] OF REAL	matriz de saída
D	REAL	
X	ARRAY[1..2] OF REAL	x(n)

4.3.4. Comunicação

A etapa da comunicação consiste na actualização das variáveis fornecidos, quer pelo controlador, quer pelo supervisor. Este ponto é executado pelo código em texto estruturado ilustrado na figura 4.19.

```
(*------------------ Comunicação -----------------*)

READ_VAR (ADR := ADDM (IN := '0.0.3{10.164.29.81}'),
          OBJ := '%MW',
          NUM := 100,
          NB := 3,
          GEST := Estado,
          RECP => Recebido);
```

Figura 4.19: Comunicação.

O código em ST está disponível na biblioteca de funções do ambiente de programação Unity Pro. Esta estrutura, denominada READ VAR, permite realizar a leitura de variáveis internas de outro dispositivo, neste caso do PLC controlador. A função em questão apresenta os seguinte parâmetros de entrada:

- ADR: Este campo deverá conter o endereço de IP do dispositvo ao qual se pretende aceder, que deve ser precedido da indicação do porto Ethernet utilizado. Considerando a configuração ilustrada na figura 4.17, a localização da porta é dada pela identificação do rack (0), posição do módulo CPU (0), e pelo canal correspondente ao porto Ethernet (3);
- OBJ: Este parâmetro deverá conter o tipo dos objectos aos quais se pretende aceder, que, para o caso de estudo, são variáveis do tipo Word localizadas na memória interna do PLC controlador, devendo por isso ser definido como %MW;
- NUM: Este parâmetro define a posição na memória interna do dispositivo à qual se pretende aceder. Deste modo, no projecto do controlador, a declaração das variáveis a transmitir deverá ser realizada de forma igual à descrita na tabela 4.5, sendo este um aspecto muito importante na sincronização entre os sistemas de controlo e de supervisão.

- NB: Este parâmetro de entrada define o número de objectos ao qual se pretende aceder, devendo por isso ser igual ao número de variáveis declaradas na tabela 4.4;

- GEST: Este parâmetro devolve a identificação do erro de comunicação, caso esta seja mal sucedida.

- RECEP: O valor das variáveis às quais se pretende aceder será guardado na estrutura passada por este parâmtero, que para o caso em questão é a tabela 4.6.

4.3.5. Estrutura do Sistema de Supervisão

A estrutura de Supervisão (Figura 4.20) engloba três módulos de geração de resíduos - ARX, Observador e Equações de Paridade - que enviam informação para o módulo de FDI. Neste módulo, são avaliados os resíduos e é dado o alarme, caso exista alguma falha. No bloco de Diagnóstico os alarmes são validados e é feita a identificação da falha e aferida a sua severidade, enviando em seguida essa informação ao bloco Supervisor.

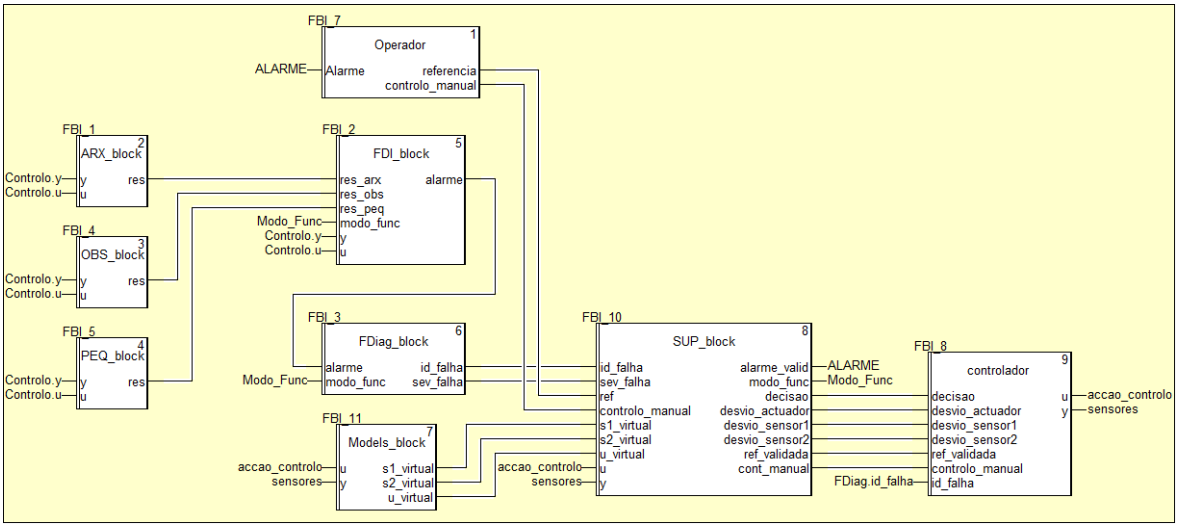

Figura 4.20: Estrutura do sistema de supervisão.

O bloco Supervisor recebe as informações acerca das falhas do bloco de diagnóstico, bem como o sinal de referência e de controlo manual do operador humano. Recebe ainda os sinais de entrada e saída do processo e as respectivas entradas e saídas virtuais para futuras correcções a enviar ao sistema de controlo. Ao sistema de controlo, envia os sinais de controlo manual e referência validados, as correcções dos sinais de entrada e saída e o sinal de decisão, caso seja necessária a reconfiguração dos parâmetros de controlo. Este bloco é reponsável por aferir o modo de funcionamento do sistema em cada instante, enviando em seguida essa informação aos outros módulos. O periodo de amostragem definido para os sistemas de controlo e supervisão é de 1s.

Sensores e Actuadores Virtuais

O bloco dos modelos é constituido por modelos dos sensores e do actuador sob a forma de espaço de estados, e tem como principal objectivo criar redundância nesses dispositivos. Isto torna possível que o sistema acomode algumas das falhas que ocorrem nesses dispositivos continuem a funcionar com um mínimo de fiabilidade. O modelo apresentado na figura 4.21 permite que o sistema continue a funcionar, com muita fiabilidade, mesmo quando o sensor de caudal, instalado à saída do tanque T_2, deixar de funcionar.

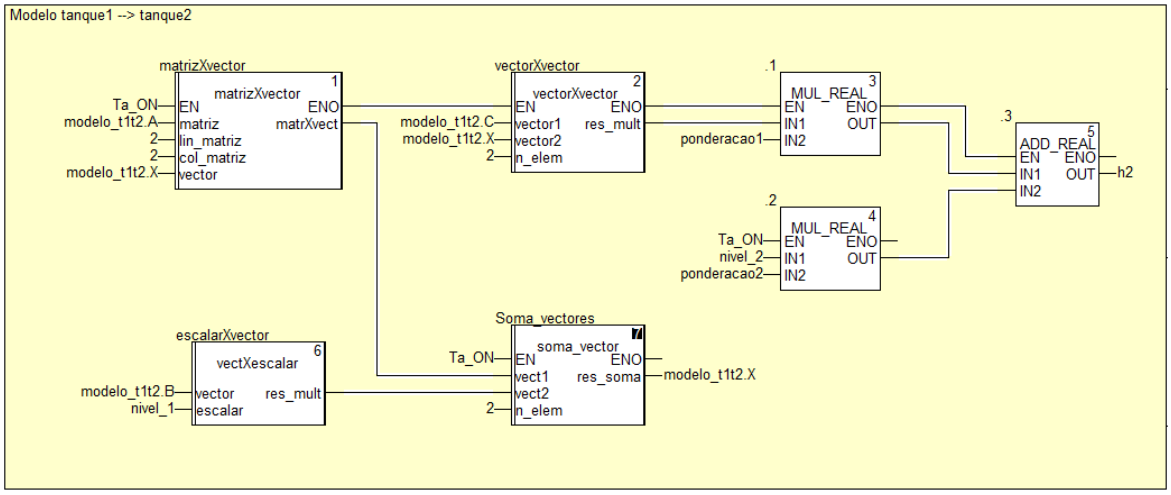

Figura 4.21: Modelo do nível do tanque T_2 com base no nível do tanque T_1.

4.4. Resultados Obtidos

Nesta secção, apresentam-se alguns resultados de experiências levadas a cabo, com o intuito de testar os sistemas de FDD e Supervisão propostos. Foram realizadas experiências com o processo em regime nominal e na presença de falhas. O sistema de supervisão e controlo com tolerância a falhas foi aplicado ao processo utilizando o UnityPro como ambiente de programação dos PLCs. Contudo, é utilizado o Matlab para a obtenção dos dados e apresentação dos mesmos em forma de gráficos.

4.4.1. Ensaio em Funcionamento Nominal

O ensaio ilustrado na figura 4.22 foi realizado com o objectivo de concluir sobre o comportamento do sistema em regime nominal, analisando tempos de subida, sobreelevação e erro estático. O ensaio considera variações do sinal de referência para o nível do tanque T_2 entre 40% e 70%.

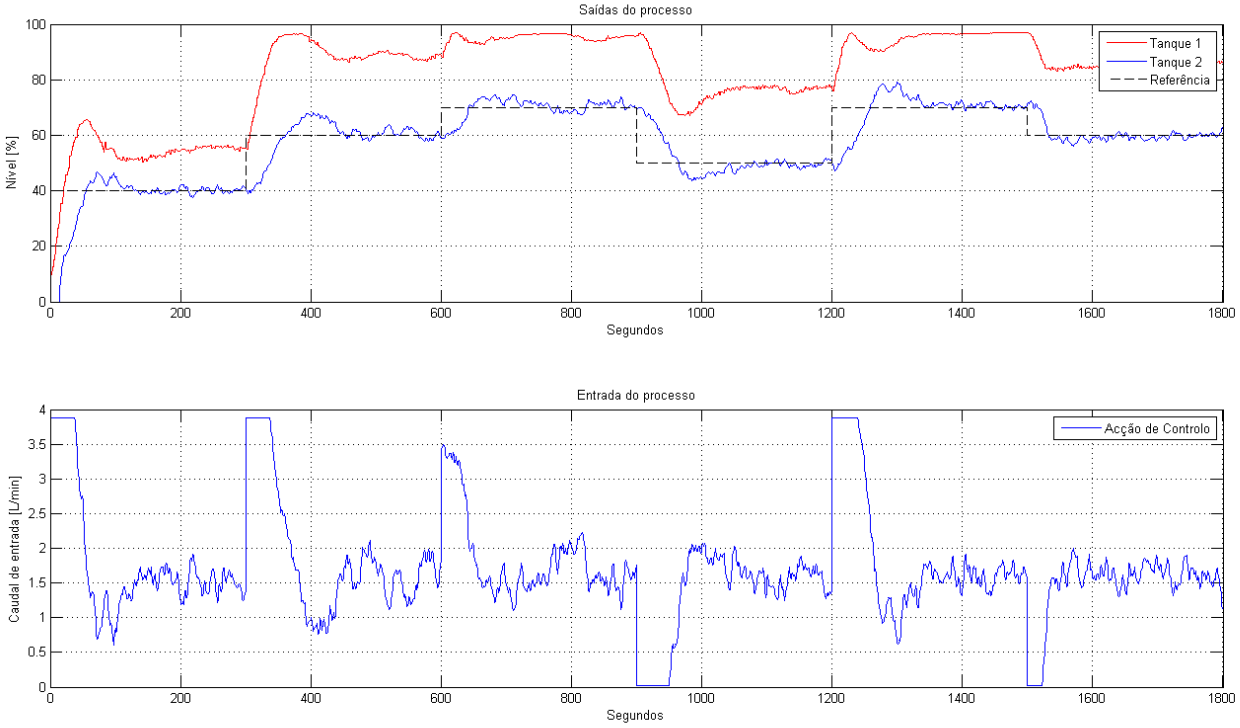

Figura 4.22: Ensaio nominal.

Pode-se concluir que os sistemas de controlo apresenta um comportamento satisfatório, tendo em conta as dificuldades impostas pelo sinal correspondente ao níve do tanque T_2, uma vez que este é fortemente corrompido por ruído que, como referido anteriormente, tem origem no hardware que efectua a interface entre os PLCs e o processo. Os sinais são filtrados à entrada do PLC Controlador, e portanto, os resultados apresentados não revelam todo o ruído que os sinais contêm.

4.4.2. Ensaios com Falhas

As falhas que foram consideradas durante os ensaios consideraram fugas de diferentes magnitudes no tanque T_1 e ainda uma fuga na tubagem de alimentação.

- Falha 1: Abertura da válvula SV_1, provocando um caudal de escoamento Q_{1F1} do tanque T_1 para o reservatório.
- Falha 2: Abertura da válvula SV_2, provocando um caudal de escoamento Q_{1F2} do tanque T_1 para o reservatório com $Q_{1F2} \approx Q_{1F1}$.
- Falha 3: Abertura das válvulas SV_1 e SV_2, provocando um caudal de escoamento Q_{1F1}+ Q_{1F2} do tanque T_1 para o reservatório.
- Falha 4: Abertura da válvula SV_3, provocando um caudal de escoamento $Q_{FT} > Q_{1F1}$+ Q_{1F2} da tubagem de alimentação ao tanque T_1 para o reservatório.

Nos quatro ensaios foi aplicada uma referência constante para o tanque T_2 de 50%. A abertura da electroválvula, nos três primeiros ensaios, foi efectuada aos 5 minutos, permanecendo aberta até ao final dos ensaios. O último ensaio tem uma duração maior devido ao tempo que o sistema leva para recuperar desta falha (cerca de 30 minutos).

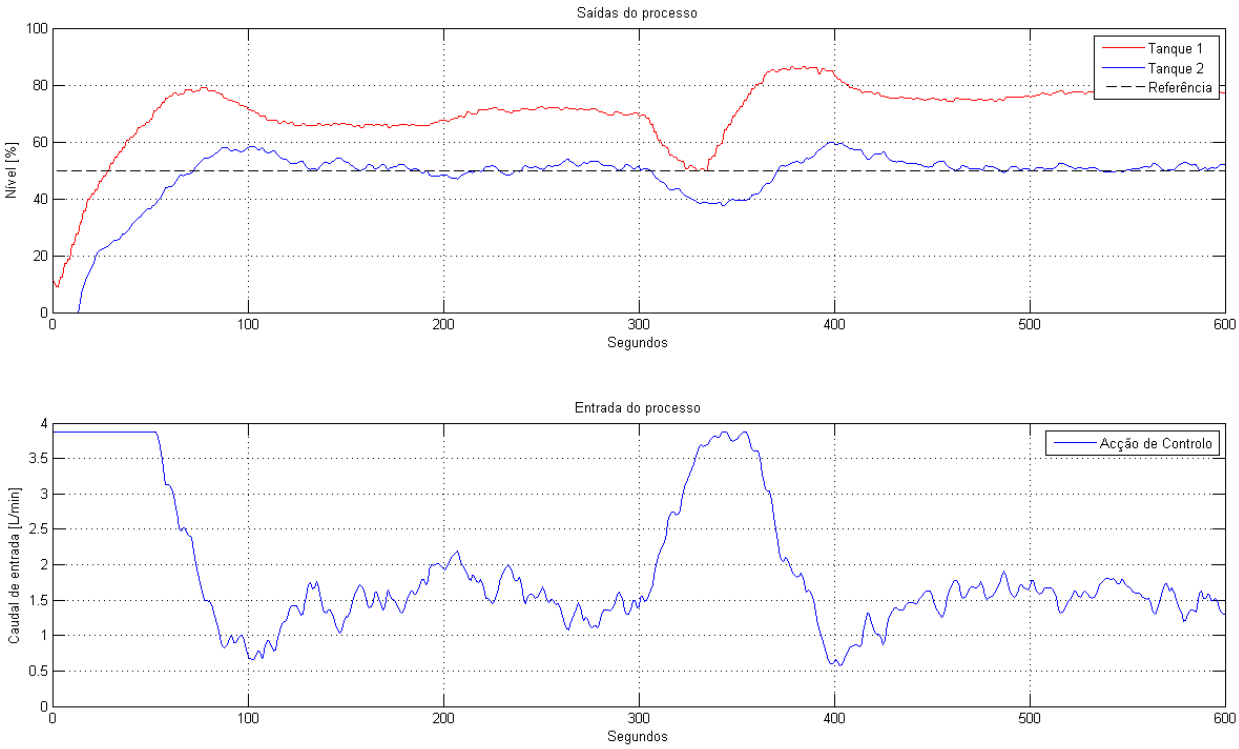

Figura 4.23: Falha 1: Abertura da válvula SV_1.

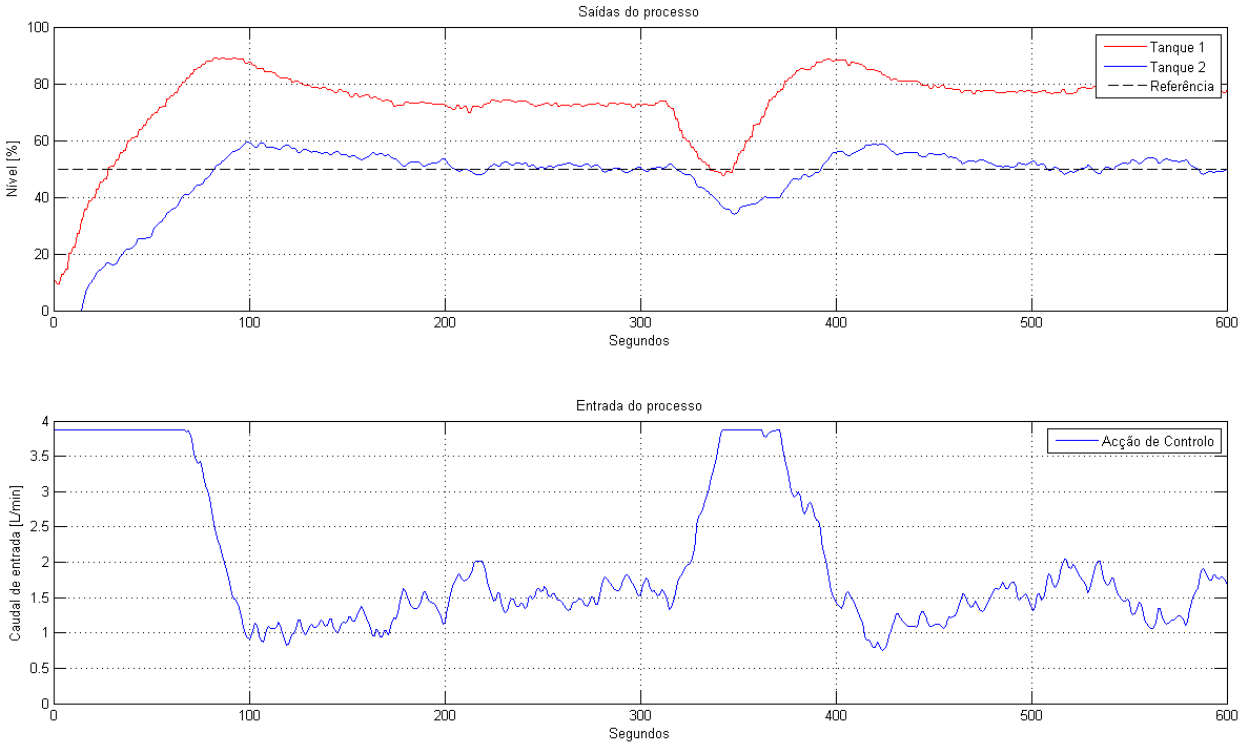

Figura 4.24: Ensaio - Falha 2: Abertura da válvula SV_2

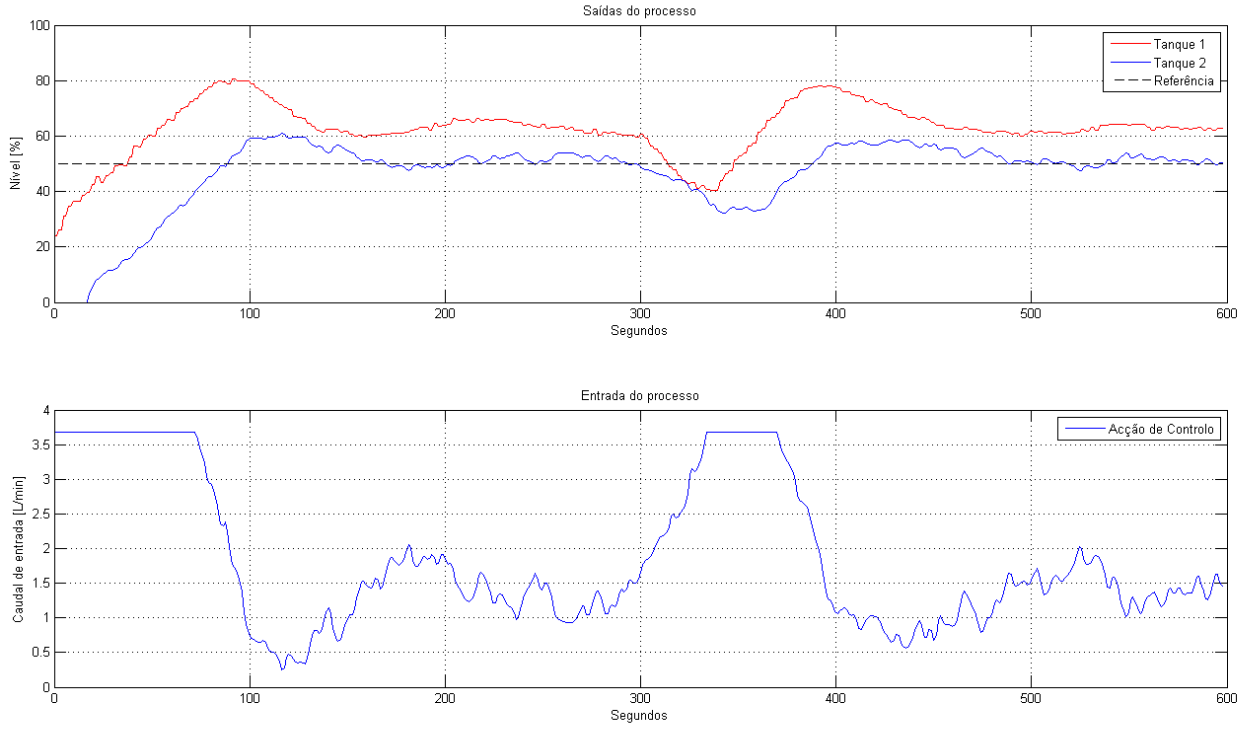

Figura 4.25: Ensaio - Falha 3: Abertura das válvulas SV_1 e SV_2.

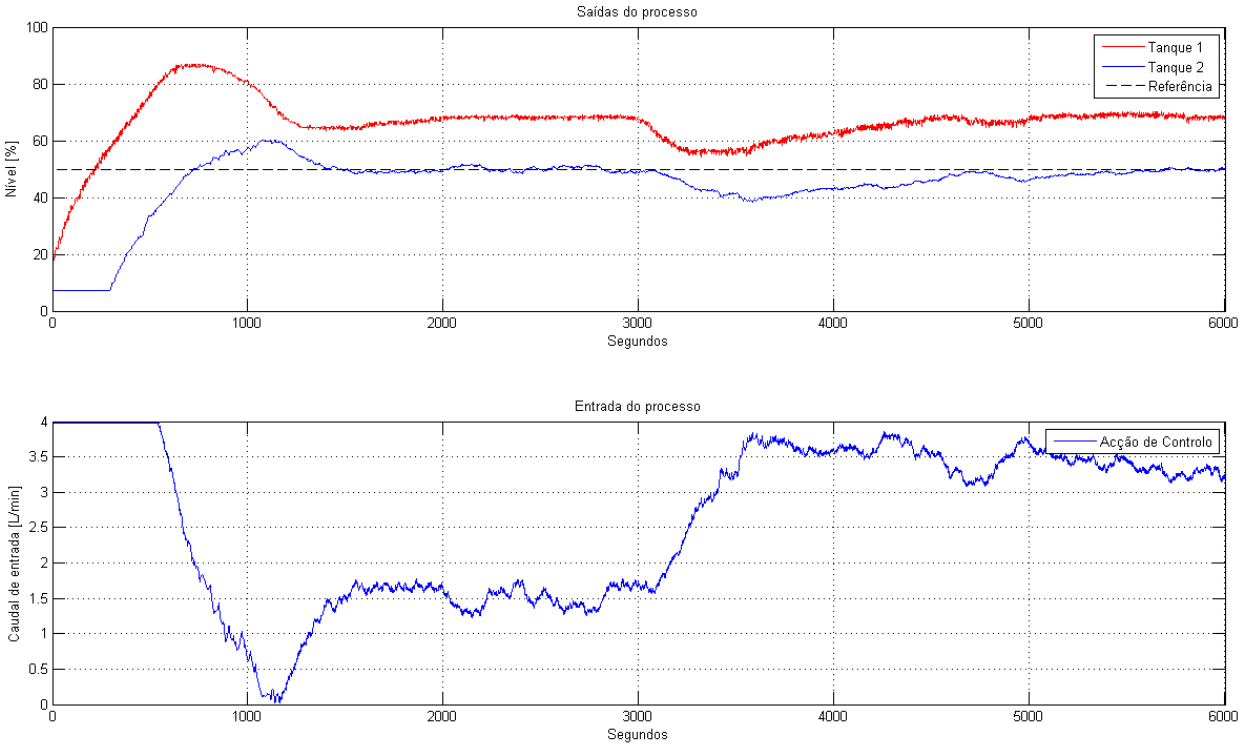

Figura 4.26 Ensaio - Falha 4: Abertura da válvula SV_3

Nos dois primeiros ensaios, tratando-se de fugas pequenas, o controlador foi capaz de acomodar de forma rápida e eficaz a falha existente, sem haver necessidade de recorrer à reconfiguração dos parâmetros de controlo.

O terceiro ensaio trata-se de uma fuga, com um grau de severidade mais alto que nos ensaios anteriores, no tanque T_1. O sistema de controlo é reconfigurado, ou seja, os parâmetros do sistema de controlo são alterados, por forma a melhorar o seu desempenho durante o período da falha, para permitir a sua acomodação (Figura 4.25). Esta acção permite uma recuperação mais rápida, voltando reconfigurar os parâmetros de controlo quando a falha é recuperada.

O último ensaio (Figura 4.26) trata de uma falha que se encontra no limite de ser recuperável, uma vez que, mesmo com a acção do sistema de supervisão, o processo demora cerca de 30 minutos a recuperar da falha e atinge um nível mínimo de 40%. Sem a acção do supervisor, o controlador também consegue recuperar, embora demore um pouco mais (cerca de 40 min) e baixe do nível de 40%.

Através da comparação dos ensaios 1, 2 e 3, é possivel observar que, para o mesmo nível do tanque T_2 (50%), durante o periodo dos 200 aos 300 segundos, o nível do tanque T_1 apresenta dois valores distintos, 70% para os dois primeiros ensaios (figuras 4.23 e 4.24) e cerca de 60% para o terceiro ensaio (figura 4.25). Esta diferença nos resultados deve-se ao comportamento não linear dos sensores, particularmente do sensor de caudal instalado no tanque T_2.

5. Conclusão

Ao terminar esta Tese, apresentam-se, na secção 5.1, as principais conclusões sobre o trabalho realizado, analisando a viabilidade do sistema de supervisão proposto, a sua implementação e aplicabilidade em processos industriais, e perspectiva-se o seu futuro desenvolvimento na secção 5.2.

5.1. Conclusões

Nesta secção são apresentadas as conclusões que se tiram deste trabalho. São avaliados os pontos positivos e negativos das abordagens efectuadas no desenvolvimento dos sistemas de FDD e de supervisão. Conclui-se ainda sobre a aplicação destas metodologias ao caso de estudo e sobre os resultados obtidos nessa experiência.

Foi feito um estado da arte acerca dos métodos de controlo tolerante a falhas, sendo dado maior relevo aos métodos activos, nos quais se incluem os sistemas de FDD e de supervisão, desenvolvidos à postriori.

Na fase de modelação do sistema, enfrentaram-se algumas dificuldades em obter modelos válidos, que descrevessem a dinâmica do processo dos dois tanques de forma fiável. Estas dificuldades têm origem em dinâmicas não lineares dos sensores e dos componentes electrónicos adjacentes a estes, corrompendo os valores obtidos para as saídas do processo, e consequentemente, também os parâmetros dos modelos obtidos. Adicionalmente, a reduzida dimensão dos reservatórios dificultou também a identificação dos diversos modos de funcionamento do sistema. Outra grande dificuldade, agora para a identificação das falhas, deveu-se ao facto de que algumas das falhas do processo (fugas no tanque T_1, fuga na tubagem e estrangulamento da tubagem), provocam comportamentos similares por parte do processo. Este facto, associado à baixa fiabilidade dos sensores, tornaram a tarefa de isolamento e identificação de falhas muito mais difícil do que se esperava.

Relativamente às linguagens de programação utilizadas, Texto Estruturado e Diagrama Funcional de Blocos, foi possível concluir que estas ferramentas possibilitam a descrição de algoritmos com uma complexidade considerável, constituindo por isso uma boa solução para a implementação deste tipo de sistemas em ambientes industriais.

A implementação dos sistemas de controlo e de supervisão em PLCs diferentes requer alguma atenção quanto aos aspectos de sincronização, durante a execução dos algoritmos e de fluxo de informação entre dispositivos. Deste modo, é possível concluir que o dimensionamento destes dois níveis deve ser realizado em paralelo, uma vez que são, de alguma forma, complementares, de forma a cobrir todos os aspectos sincronização entre os dois projectos.

No que respeita aos ensaios executados, verificou-se, nos dois primeiros ensaios com falhas, um comportamento idêntico, por parte do processo, o que impossibilitou que uma distinção entre as duas falhas fosse coerente ao longo do tempo. Ambas as falhas consistem em fugas do tanque T_1 e, têm aproximadamente a mesma grandeza, resultando em falhas muito idênticas, e por isso, impossíveis para o sistema de FDD de as distinguir. Este ponto negativo seria corrigido, por exemplo, por uma troca das tubagens utilizadas para a simulação das falhas em questão.

Em suma, o conjunto de resultados obtidos no caso de estudo mostram a aplicabilidade do sistema de supervisão proposto e evidenciam a importância dos temas abordados para o desenvolvimento de instalações industriais mais autónomas, eficazes e seguras.

5.2. Trabalho Futuro

Nesta secção são apresentadas propostas, para trabalhos futuros, que se consideram importantes para o desenvolvimento das áreas de automação e controlo tolerante a falhas.

Uma das propostas cconsidera a implementação de outros métodos de detecção e diagnóstico de falhas, tais como os apresentados no capítulo 2 deste documento. Esta proposta visa melhorar a eficiência e confiabilidade do projecto, não só por questões de redundância, mas também para desenvolver novas metodologias com algoritmos matemáticos de maior complexidade, utilizando as linguagens de programação para PLCs.

Um aspecto a melhorar é, sem dúvida, a interface com o operador humano. O desenvolvimento de uma interface HMI, compatível com os PLCs utilizados, que fornecesse ao supervisor humano todas as informações sobre o estado do sistema, poderia melhorar, sem dúvida, a operabilidade e a precepção da existência de falhas na instalação. Adicionalmente, seria muito útil um algorítmo que permitisse guardar o histórico das variáveis do sistema, e que as disponibilizasse, quer na própria interface HMI, quer através de um ficheiro de dados.

Para melhorar o desempenho do sistema de supervisão, seria interessante adicionar alguma redundância a nível de sensores e actuadores na instalação. Desta forma seria possível explorar novos tipos de falhas, aumentando a sua complexidade e aproximando ainda mais o caso de estudo dos sistemas reais que existem a operar na indústria.

Uma funcionalidade muito interesssante, a ser considerada no futuro, é o desenvolvimento de metodologias que permitam aceder remotamente ao processo, abordando os aspectos de comunicação, segurança e fiabilidade adjacentes. Seria também interessante explorar os outros protocolos de comunicação disponíveis nestes dispositivos, tais como Modbus e CANopen, analisando os efeitos que as falhas de comunicação entre PLCs introduziriam no anel de controlo e supervisão.

Bibliografia

An, Y.H.: A design of fault tolerant flight control systems for sensor and actuator failures using online learning neural networks. Ph.D. thesis, West Virginia University, 1998.

Anand, M.D., Selvaraj, T., Kumanan, S., Janarthanan, J.: A hybrid fuzzy logic artificial neural network algorithm-based fault detection and isolation for industrial robot manipulators. Int. J. Manuf. Res. 2(3), 2007.

Aravena, J.:Detecting change using pseudo power signatures, Proc. 2002 IFAC Congress, Barcelona, Spain, July 2002.

Åström, K.J., Wittenmark, B.: Adaptive Control. Addison-Wesley, Reading, 1989.

Avizienis, A.: Infraestructure-based design of fault-tolerant systems. In: Proceedings of the IFIP International Workshop on Dependable Computing and its Applications. DCIA 98, Johannesburg, South Africa, January 1998.

Beard, R. V.: Failure Accommodation in Linear Systems Through Self-reorganization, Ph.D. Dissertation, Aeronautics and Astronautics Department, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, MA, 1971.

Bocaniala, C.D., Palade, V.: Computational Intelligence Methodologies in Fault Diagnosis: Review and State of the Art. Springer, Berlin, 2006.

Bolton, W.:Programmable Logic Controllers: An Introduction, Butterworth-Heinemann, 1997.

Boutayeb M., Aubry D.: A strong tracking extended Kalman observer for nonlinear discrete-time systems - Automatic Control, IEEE Transactions on, 1999

Clements-Jewery, K.; Jeffcoat, W.: "The PLC Workbook; Programmable Logic Controllers made easy", Prentice Hall, 1996.

Dumont, G.A., Huzmezan, M.: Concepts, methods and techniques in adaptive control. In: Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, AK, USA, 2002.

Dunning, G.: “Introduction to Programmable Logic Controllers”, Delmar, 1998.

Frey,G.;Litz, L. "Formal Methods in PLC Programming", Nashville, 2000.

Gil P.:Filtro de Kalman Em Tempo Discreto, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2002.

Huang, X., Liu, J., Niu, Y.: Fault Detection of Actuator with Digital Positioner Based on Trend Analysis Method, North China, Electric Power University, P.R. China, 2010.

Jones, C.N.: Reconfigurable flight control: First year report. Technical report, Cambridge University Engineering Department, 2005.

Jones, H. L.: Failure Detection in Linear System, PhD. Dissertation, Aeronautics and Astronautics Department, Massachusetts Inst. Of Technology, Cambridge, MA, 1973.

Konstantinov, K. B., Yoshida, T.: Real-time qualitative analysis of the temporal shapes of the (bio) process variables, American Institute of Chemical Engineers Journal 38, 1995.

Korbicz, J., Koscielny, J.M., Kowalczuk, Z., Cholewa, W.: Fault Diagnosis: Models, Artificial Intelligence, Applications. Springer, Berlin, 2004.

Kovácsházy, T., Péceli, G. , Simon, G.: Transient reduction in reconfigurable control systems utilizing structure dependence. Proc. of the Instrumentation and Measurement Technology Conference. Budapest, Hungary, 2001.

Kowal, M., Korbicz, J.: Robust fault detection using neuro-fuzzy networks. In: IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.

Lemos, J., Rato, L., Marques,J.: Switching reconfigurable control based on hidden Markov models. Proc. of the European Control Conference (ECC'99). Karlsruhe, Germany, 1999.

Magni, J.F., Bennani, S., Terlouw, J.: Robust Flight Control: A Design Challenge. Springer, Berlin, 1997.

Marzat, J., Piet-Lahanier, H., Damongeot, F. Walter, E.: Autonomous Fault Diagnosis: State of Art and Aeronaultical Benchmark, 2009.

Mirea, L., Patton, R.J.: Component fault diagnosis using wavelet neural networks with local recurrent structure, In: Proceedings of the IFAC Symposium SAFEPROCESS '06, Pequim, China, 2006.

Moreira, A., Costa, P., Santos, P.: Introdução à identificação de modelos discretos para sistemas dinâmicos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2002.

Palma, L.: Fault Detection, Diagnosis And Fault Tolerance Approaches In Dynamic Systems Based On Black-Box Models, Phd thesis, Universidade Nova de Lisboa - FCT, Portugal, 2007.

Patton, R.J.: Fault detection and diagnosis in aerospace systems using analytical redundancy. Computing & Control Engineering Journal, 1991.

Patton, R.J., Chen, J.: Optimal unknown input distribution matrix selection for robust fault diagnosis. Automatica 29, 1993.

Patton, R.J., Chen, J., Benkhedda, H.: A study on neuro-fuzzy systems for fault diagnosis, Int. J. Syst. Sci. 31(11), 2000(b).

Patton, R.J., Frank, P.M., Clark, R.N.: Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Application, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.

Patton, R.J., Korbicz, J.: Advances in computational intelligence for fault diagnosis systems. Special issue of International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 9(3), 1999.

Patton, R.J., Uppal, F.J., Lopez-Toribio, C.J.: soft computing approaches to fault diagnosis for dynamic systems: a survey. In: Proceedings of the IFAC Symposium SAFEPROCESS'00, Budapest, Hungary, 2000(a).

Puig, V., Witczak, M., Nejjari, F., Quevedo, J., Korbicz, J.: A GMDH neural network-based approach to passive robust fault detection using a constraint satisfaction backward test. Eng. Appl. Artif. Intell. 20(7), 2007.

Ramos, Adilson, M. N.: Estudo de Técnicas de Controle Preditivo Baseado em Modelo (CPBM), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2003.

Rato, L.: Controlo Comutado Baseado em Modelos Múltiplos. PhD Thesis, IST, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2002.

Slotine, J.J.E., Li, W.: Applied Nonlinear Control. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.

Spirkovska, L., Iverson, D.L., Poll, S., Pryor, A.: Inductive learning approaches for improving pilot awareness of aircraft faults, Technical report 20060017823, NASA, 2005.

Uppal, F.J., Patton, R.J., Witczak, M.: A neuro-fuzzy multiple-model observer approach to robust fault diagnosis based on the DAMADICS benchmark problem. Control Eng. Pract.14, 2006.

Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R..: A review of process fault detection and diagnosis Part III: Process history based methods, Computers and Chemical Engineering 27, 2003.

Witczak, M.: Advances in model-based fault diagnosis with evolutionary algorithms and neural networks. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. 16(1), 2006.

Yu, D.L., Gomm, J.B.: Implementation of neural network predictive control to a multivariable chemical reactor. Control Eng. Pract. 11(11), 2003.

Zhang, Y., Jiang, J.: Bibliographical review on reconfigurable fault tolerant control systems. In: Proceedings of the IFAC Symposium SAFEPROCESS ’03,WA, USA, 2003.

Frey,G.;Litz, L. "Formal Methods in PLC Programming", Nashville, 2000.

Anexo A

A.1 - Sensor de Nível

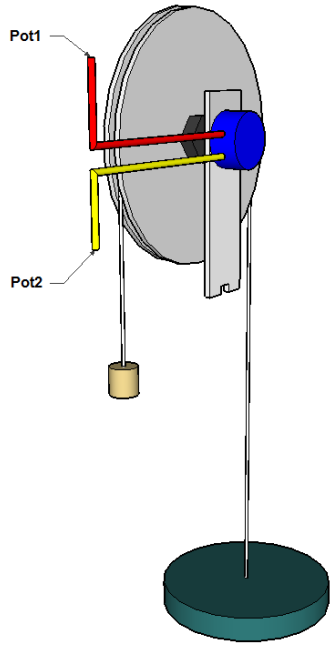

Figura A.1: Aparelho sensor de nível.

O aparelho ilustrado na Figura A.1 apresenta aos terminais do potenciómetro um valor resistivo proporcional à altura da boia. O circuito desenvolvido consiste num divisor de tensão, em que um dos resistores é precisamente o potenciómetro acoplado à roldana do aparelho da figura A.1. À medida que a resistência aos terminais do potenciómetro varia (Figura A.2), a tensão entre o terminal 5 e o terminal 4 (massa) do circuito integrado LM358AD varia também e, por conseguinte a tensão entre Vout e a massa também varia. O circuito integrado LM358AD garante uma alta impedância à saída do circuito, o que significa que não interfere com os circuitos internos do PLC.

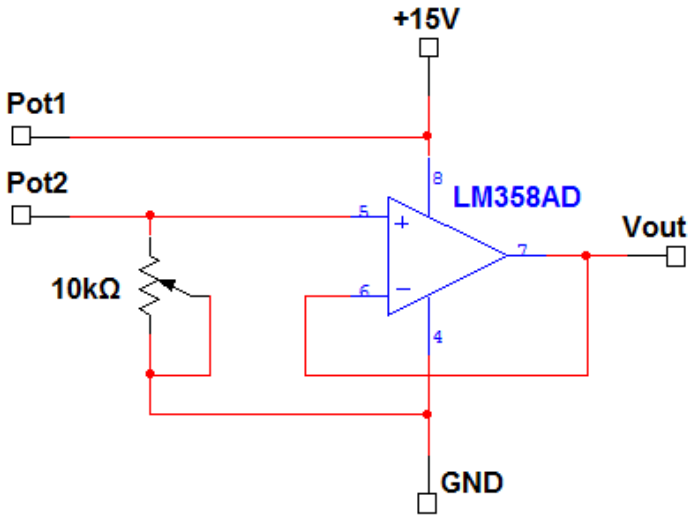

Figura A.2: Circuito auxiliar ao sensor de nível.

A.2 - Caudalímetro

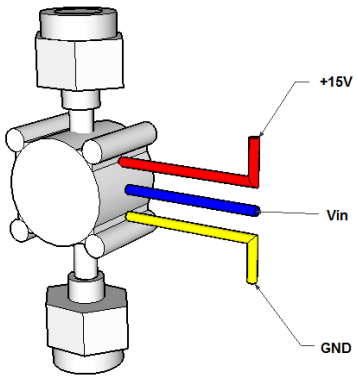

Figura A.3: Caudalímetro.

O sensor de caudal, ou caudalímetro, funciona de forma semelhante aos geradores hidroeléctricos. Possui uma pequena turbina no seu interior que, quando atravessada por um fluido, faz girar um pequeno dínamo que apresenta aos terminais um sinal pulsado com amplitude de 15V e frequência proporcional à velocidade angular da turbina. Uma vez que este sinal não poderia ser lido pelo PLC, foi necessário desenvolver alguma electrónica auxiliar para converter a variação de frequência em variação de tensão. O sinal à saída do circuito apresenta uma tensão contínua com valores compreendidos entre 7V e 9V.

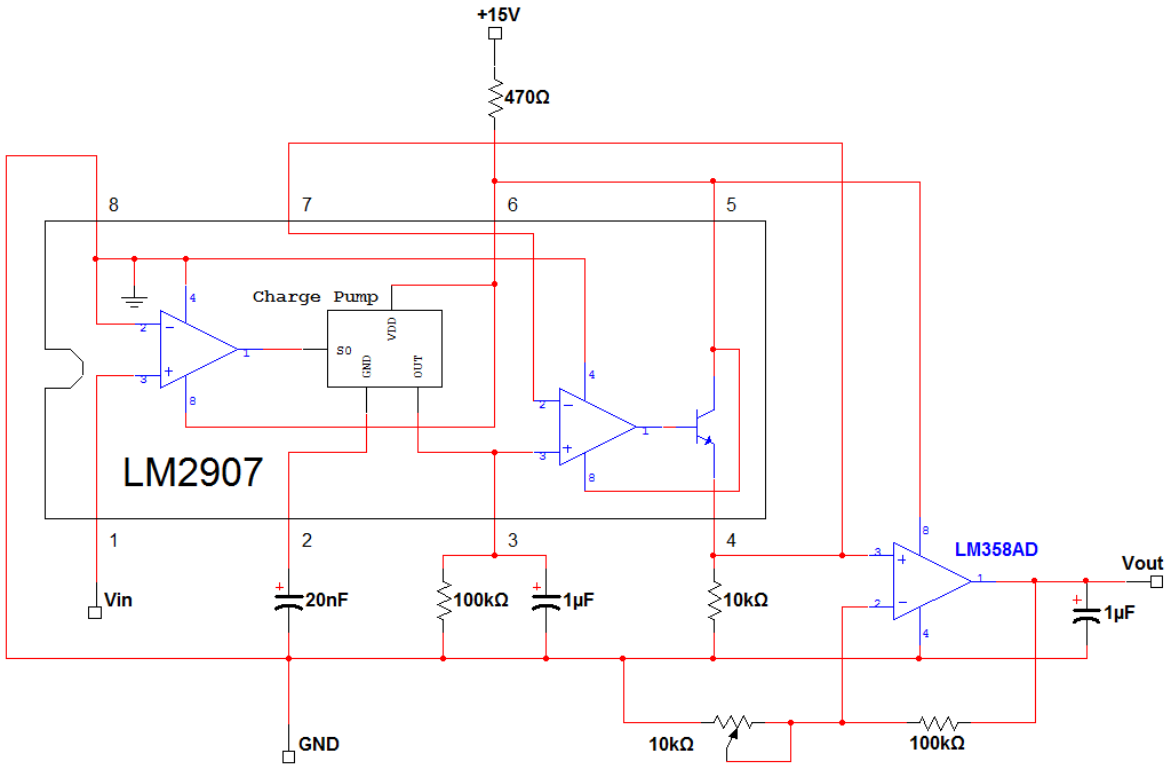

Figura A.4: Circuito conversor Frequência-Tensão.

A.3 - Electroválvulas

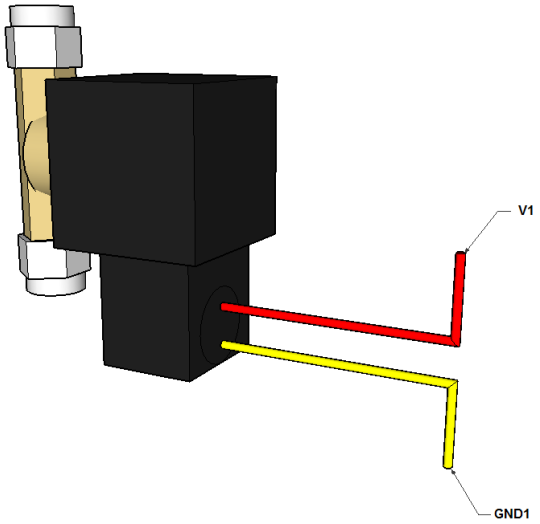

Figura A.5: Electroválvula.

As electroválvulas presentes no processo possuem características que impossibilitam o PLC de activar várias ao mesmo tempo. Isto resulta do facto de a corrente máxima que o PLC impõe nas suas saídas ser inferior à corrente necessária para activar as electroválvulas. Assim, foi desenvolvida alguma electrónica auxiliar, que permite que os PLC apenas enviem sinais de comando, e as electroválvulas sejam alimentadas por outra fonte que não o PLC.

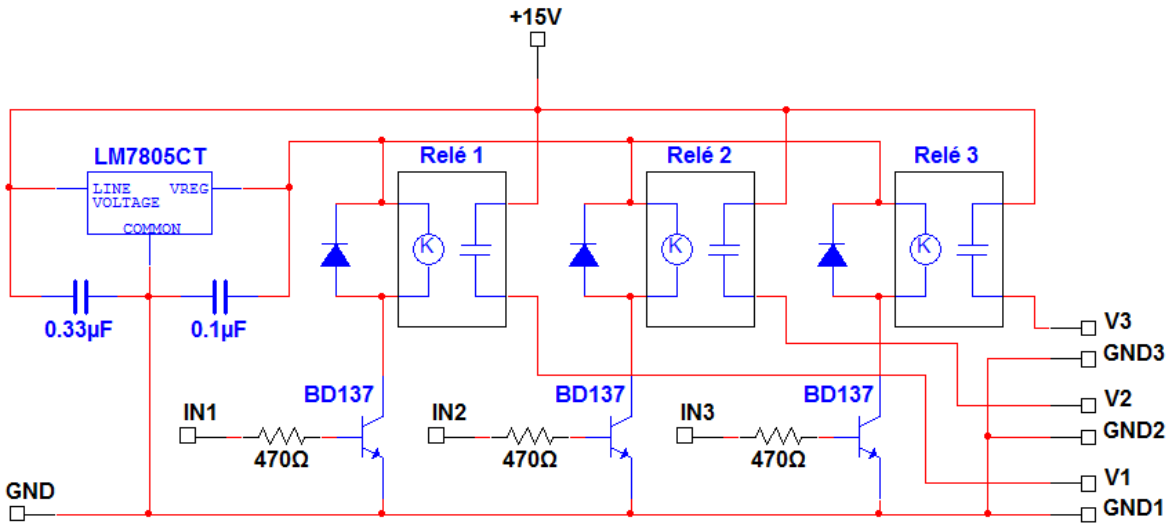

Figura A.6: Circuito auxiliar às electroválvulas.

Anexo B

B.1 – Calibração dos Sensores

Inicialmente, foi feita uma calibração do sensor de nível, uma vez tratar-se do sensor mais fiável para o efeito. Para isso, foram medidos os valores de tensão para toda a gama de níveis de água do tanque T_2. Em seguida procedeu-se à calibração do caudalímetro, utilizando a curva de valores de tensão do sensor de nível, obtida anteriormente. A curva obtida é apresentada na Figura A.7.

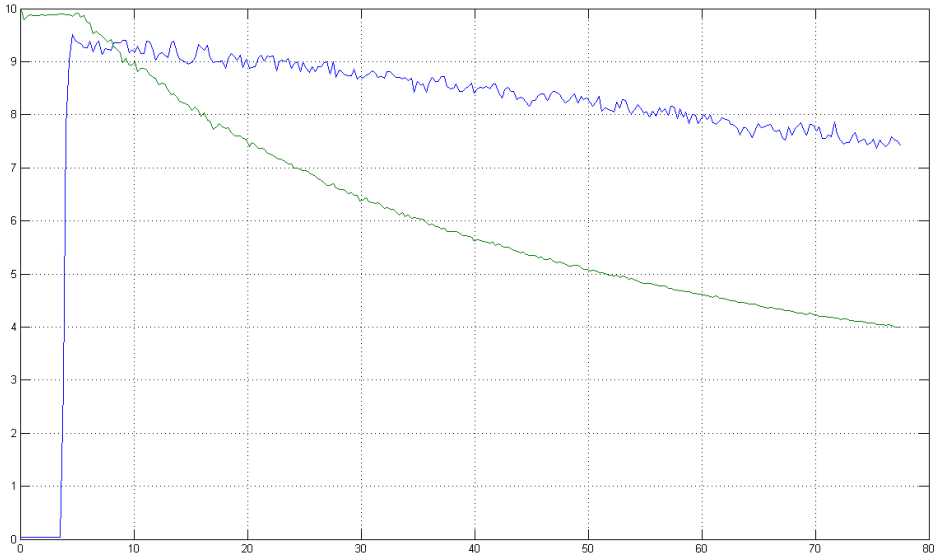

Figura B.1: Curva de calibração do sensor de Caudal.

Anexo C

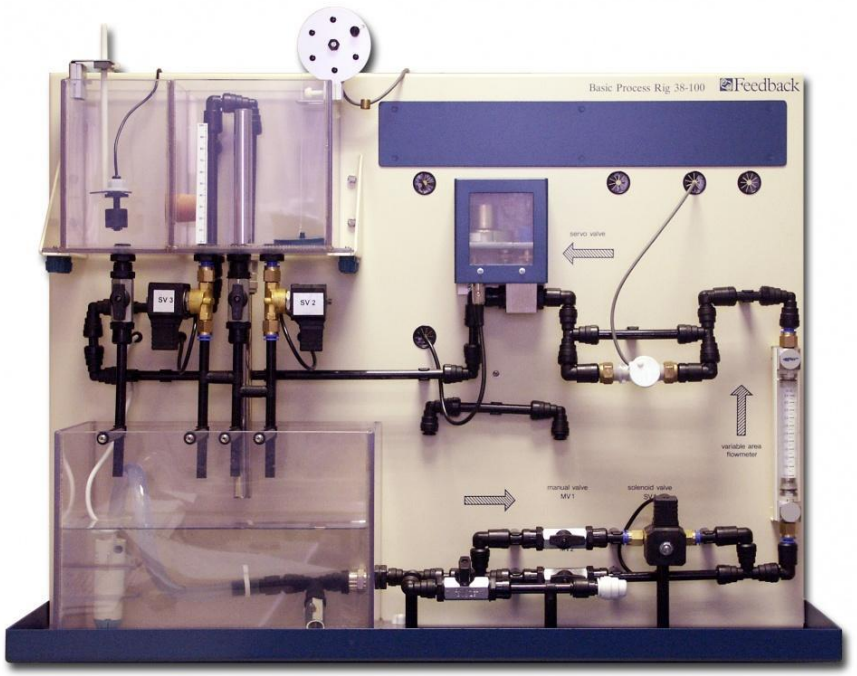

Figura C.1: Instalação Laboratorial Feedback 38-100

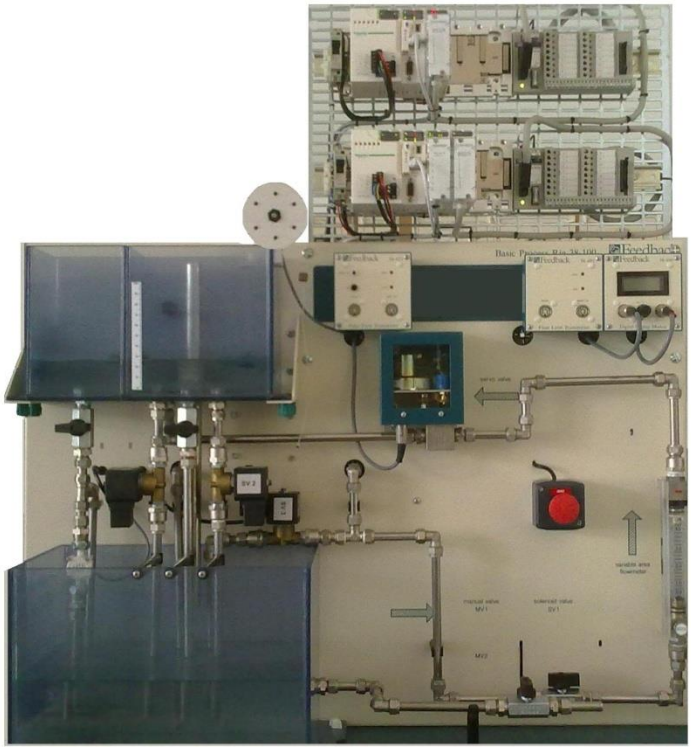

Figura C.2: Instalação laboratorial Feedback 38-100 modificada