

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL

Isabel Sartori

EXAME DE QUALIFICAÇÃO AO DOUTORADO

**Gerenciamento de eventos anormais de uma unidade de
processamento de gás natural através de sistemas de detecção e
diagnóstico de falhas**

Salvador, BA – Brasil

Abril de 2010

Isabel Sartori

**Gerenciamento de eventos anormais de uma unidade de
processamento de gás natural através de sistemas de detecção e
diagnóstico de falhas**

Exame de Qualificação ao
Doutorado, Programa de Engenharia
Industrial, Escola Politécnica,
Universidade Federal da Bahia

Orientadores:

Marcelo Embiruçu de Souza

Maurício Bezerra de Souza
Júnior

Karen Valverde Pontes

Salvador, BA – Brasil

Abril de 2010

RESUMO

O gás natural é um componente vital para o suprimento mundial de energia. Tratando-se do Brasil, a indústria de gás tem uma grande importância estratégica e econômica para o desenvolvimento do país. O processamento de gás natural tem como principal objetivo garantir a especificação do gás para os consumidores finais do produto. Na maioria das indústrias do cenário atual, existe uma necessidade de produzir com alta qualidade, de reduzir as taxas de rejeição do produto e de satisfazer leis que regulamentam questões ambientais e de segurança do trabalho. O gerenciamento de eventos anormais (*Abnormal Event Management*, AEM), que é composto das tarefas de detecção, diagnóstico (isolamento e análise) e correção de falhas - *Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction*, FDIAC - é aplicado a processos a fim de se conseguir uma operação eficiente e segura, garantindo as necessidades anteriormente descritas.

O objetivo geral da tese é desenvolver um sistema de detecção, diagnóstico e correção (FDIAC) de falhas, que será aplicado a uma Unidade de Recuperação de Gás Natural (URGN), utilizando técnicas de inteligência artificial e focando nas falhas do sistema de compressão do gás de venda. Na tese também será desenvolvida e aplicada uma nova metodologia que utiliza os fundamentos de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (*Reliability, Availability and Maintainability*, RAM) como instrumento facilitador da FDIAC de plantas industriais. A metodologia será aplicada a uma URGN da Petrobras localizada no município de Pojuca na Bahia (URGN-3-Bahia), e o sistema de FDIAC será desenvolvido para o problema prioritário apontado: as falhas do sistema de compressão do gás de venda.

O presente texto faz parte de um exame de qualificação ao doutorado que pretende mostrar, com clareza e objetividade, os objetivos, a relevância e a contribuição original do tema da tese, o estado da arte, a viabilidade e a aderência dos métodos aos objetivos propostos.

PALAVRAS-CHAVE

detecção, diagnóstico e correção de falhas; confiabilidade; plantas industriais; gás natural

ABSTRACT

Natural gas is a vital component of world energy supply. The natural gas industry is of strategic and economic importance for the development of Brazil. The main goal of natural gas processing is to provide the specification of gas for the final product consumers. Currently, in most industries it is needed to produce with high quality, to reduce product rejection rates and to meet laws governing environmental and occupational safety. The Abnormal Event Management (AEM), which is composed of the tasks of Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction (FDIAC), is applied to processes in order to achieve a safe and efficient operation, ensuring the needs described above.

The overall objective of the thesis is to develop a fault detection, diagnosis and correction (FDIAC) system for a Recovery Unit of Natural Gas (URGN) using artificial intelligence techniques and focusing on the faults of the sales gas compression system. In this thesis a new methodology incorporating reliability, availability and maintainability (RAM) as a FDIAC facilitator of industrial plants will also be developed and applied. The new methodology will be applied in the Petrobras URGN located at Pojuca-Bahia-Brazil (URGN-3-Bahia), and the FDIAC system will be developed for the priority problem pointed out: the faults of a sales gas compression system.

This text is part of a doctorate qualifying exam. This exam intends to show clearly and objectively the objectives, relevance and contribution of the thesis original theme, the state of the art, the feasibility of the methods and the adherence to the goals.

KEYWORDS

fault detection, diagnosis and correction; reliability; industrial plants; natural gas

ÍNDICE

Capítulo I. Introdução	1
I.1. MOTIVAÇÃO, IMPORTÂNCIA E OBJETIVOS	3
I.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO REALIZADO	6
Capítulo II. Detecção, diagnóstico e correção de falhas em processos industriais: Uma proposição consistente de definições e terminologias	8
II.1. INTRODUÇÃO	10
II.2. CONCEITO E DENOMINAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA	13
II.3. DEFINIÇÕES DOS OBJETOS DE ESTUDO DA ÁREA	14
II.3.1. EVENTO DE FALHA (<i>FAILURE</i>)	15
II.3.2. ESTADO DE FALHA (<i>FAULT</i>)	15
II.3.3. DEFEITO (<i>DEFECT</i>)	17
II.3.4. MAU FUNCIONAMENTO (<i>MALFUNCTION</i>)	17
II.3.5. ERRO/ ENGANO (<i>ERROR / MISTAKE</i>)	17
II.3.6. CORRELAÇÃO EXISTENTE ENTRE OS OBJETOS DE ESTUDO DE AEM	18
II.4. PRINCIPAIS TAREFAS DE SISTEMAS DE AEM	20
II.4.1. DETECÇÃO DE FALHAS	20
II.4.2. DIAGNÓSTICO DE FALHAS	21
II.4.3. CORREÇÃO DE FALHAS	22
II.4.4. CORRELAÇÃO EXISTENTE ENTRE AS PRINCIPAIS ATIVIDADES DE UM SISTEMA DE AEM	23
II.5. TIPOS DE FALHAS	24
II.6. TÉCNICAS DE FDIAC	27
II.7. CONCLUSÃO	31

Capítulo III. Detecção, diagnóstico e correção de falhas em processos industriais: Um panorama das pesquisas no Brasil e no mundo	39
III.1. INTRODUÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA DE PESQUISA	41
III.2. DELIMITAÇÃO E METODOLOGIA DA PESQUISA REALIZADA	43
III.3. PRODUÇÃO CIENTÍFICA INTERNACIONAL	44
III.4. PRODUÇÃO CIENTÍFICA BRASILEIRA	48
III.5. CONCLUSÃO	64
Capítulo IV. O gás natural, a unidade de recuperação de gás natural e o sistema de compressão do gás de venda	96
IV.1. O GÁS NATURAL	98
IV.2. A UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE GÁS NATURAL	100
IV.3. O SISTEMA DE COMPRESSÃO DO GÁS DE VENDA	104
Capítulo V. Conclusões parciais	109
V.1. CONCLUSÕES PARCIAIS	111
V.2. ATIVIDADES FUTURAS	112
Anexo I. Cronograma de atividades	114
Anexo II. Lista de publicações	117
Apêndice A. A new class of life distributions based on Tsallis statistics in reliability engineering	118
A.1. INTRODUCTION	120

A.2. LIFE DISTRIBUTIONS	122
A.2.1. q -WEIBULL DISTRIBUTION	122
A.2.2. q -EXPONENTIAL DISTRIBUTION	124
A.2.3. q -LOGNORMAL DISTRIBUTION	125
A.3. CONCLUSION	127

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1. Correlação entre os objetos de estudo da área de pesquisa	20
Figura II.2. Principais atividades de sistemas de AEM	24
Figura III.1. Distribuição temporal da produção científica internacional na área de FDIAC	45
Figura III.2. Teses de doutorado e dissertações de mestrado brasileiras (na área de FDIAC com aplicação em problemas industriais) ao longo dos anos	49
Figura III.3. Número de teses de doutorado e dissertações de mestrado nacionais (na área de FDIAC com aplicação em problemas industriais) por instituição de ensino	50
Figura III.4. Distribuição das aplicações industriais das teses e dissertações brasileiras na área de FDIAC	51
Figura IV.1. Cadeia produtiva do gás natural (Vaz <i>et al.</i> , 2008)	100
Figura IV.2. Produtos de uma UPGN (Máximo Filho, 2005)	102
Figura IV.3. Compressor de cilindro e pistão (Máximo Filho, 2005)	105

LISTA DE QUADROS

Quadro II.1. Denominação da área de pesquisa	14
Quadro II.2. Objetos de estudo da área de pesquisa	19
Quadro II.3. Principais atividades de sistemas de AEM	23
Quadro II.4. Classificação das técnicas com base no conhecimento <i>a priori</i> utilizado	28
Quadro II.5. Trabalhos mais citados nas diferentes técnicas utilizadas para FDIAC	30
Quadro II.6. Técnicas mais utilizadas nos sistemas de FDIAC aplicados a sistemas elétricos, indústrias de processo, sensores e equipamentos rotativos e rolamentos	31
Quadro III.1. Informações sobre pesquisadores brasileiros(*) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais e seus grupos de pesquisa	52
Quadro III.2. Teses e dissertações orientadas na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais pelos demais pesquisadores brasileiros, não relacionados no Quadro III.1	60
Quadro III.3. Produção científica brasileira publicada em periódicos indexados na <i>Web of Science</i> (WS, 2010) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais	62

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1. Distribuição da produção científica internacional na área de FDIAC entre as áreas de conhecimento	45
Tabela III.2. Distribuição da produção científica internacional na área de FDIAC entre os principais periódicos da área	46
Tabela III.3. Distribuição da produção científica internacional na área de FDIAC entre os países	47
Tabela III.4. Distribuição da produção científica internacional na área de FDIAC entre as instituições de ensino e pesquisa	47
Tabela III.5. Distribuição da produção científica internacional na área de FDIAC entre autores	48

CHAPTER I

Chapter I. Introduction

ABSTRACT

The purpose of this chapter is to present and discuss the motivation, the importance and overall purpose of the thesis, which is to develop a fault detection, diagnosis and correction (FDIAC) system for Recovery Unit of Natural Gas (URGN) using artificial intelligence techniques and focusing on the faults of the sales gas compression system. In this thesis will also be developed and applied a new methodology that uses the study of reliability, availability and maintainability (RAM) as a FDIAC facilitator of industrial plants. Moreover, it also presented the chapters organization of this work.

KEYWORDS

fault detection, diagnosis and correction; reliability; industrial plants; natural gas

CAPÍTULO I

Capítulo I. Introdução

RESUMO

A finalidade deste capítulo é apresentar e discutir a motivação, a importância e o objetivo geral da tese, que é desenvolver um sistema de detecção, diagnóstico e correção (FDIAC) de falhas de uma Unidade de Recuperação de Gás Natural (URGN), utilizando técnicas de inteligência artificial e focando nas falhas do sistema de compressão do gás de venda. Na tese também será desenvolvida e aplicada uma nova metodologia que utiliza o estudo de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (RAM) como instrumento facilitador da FDIAC de plantas industriais. Além disso, é também apresentada a organização dos capítulos do presente trabalho.

PALAVRAS-CHAVE

detecção, diagnóstico e correção de falhas; confiabilidade; plantas industriais; gás natural

I.1. MOTIVAÇÃO, IMPORTÂNCIA E OBJETIVOS

O gerenciamento de eventos anormais (*Abnormal Event Management*, AEM), que é composto das tarefas de detecção, diagnóstico (isolamento e análise) e correção de falhas - *Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction*, FDIAC – é uma prática antiga dos processos industriais, tradicionalmente executada pelo homem. Com a crescente automatização destas tarefas, técnicas cada vez mais sofisticadas passaram a ser utilizadas. O grande escopo das tarefas de AEM faz com que esta atividade seja difícil de ser realizada por operadores humanos de forma confiável. O tamanho e a complexidade das plantas modernas tornam esta tarefa ainda mais complicada. Plantas grandes podem ter milhares de variáveis de processo observadas e monitoradas a cada segundo. Além disso, a necessidade de um AEM rápido, aliada à insuficiência, incompletude e/ou desvio (erros) nas informações, o que torna necessária a utilização de modelos e algoritmos diversos, dificulta a realização destas tarefas pelo homem. Isto tudo faz com que operadores de processo cometam erros. Estatísticas industriais mostram que 70% dos acidentes são causados por erros humanos (Venkatasubramanian *et al.*, 2003), o que, portanto, justifica a automatização das etapas de FDIAC.

Por outro lado, vale ressaltar que, embora todas as tarefas de detecção, diagnóstico e correção de falhas possam, em princípio, ser implementadas de forma automática, isto nem sempre é necessário (Chiang *et al.*, 2001). Por exemplo, a automatização pode ser completa apenas para os procedimentos de detecção e isolamento de falha, ao invés de ser aplicada ao esquema inteiro. A análise e a correção podem ser feitas de forma sugestiva pelo sistema, que pode descrever inclusive as várias possibilidades de ocorrência, sendo bastante útil para ajudar operadores e engenheiros a analisar, identificar e corrigir a falha, inserindo de forma mais eficiente o trabalho humano no AEM. Diante destes argumentos, parece ser factível fazer um estudo que contemple a etapa de correção de falhas, além das etapas de detecção e diagnóstico das falhas. Apesar do exposto, esta proposta é original, comparada ao que fazem a maioria dos sistemas reais e ao existente nos trabalhos científicos, que só abrangem a detecção e o isolamento das falhas.

Segundo Venkatasubramanian *et al.* (2003), a indústria de processo considera a automatização dos sistemas de AEM como o próximo marco da pesquisa e da aplicação

de sistemas de controle, assim como foi a automatização do controle regulatório no passado. Apesar da crescente utilização de controladores de processo (PIDs, controladores preditivos, entre outros), que são projetados para compensar perturbações e manter o processo operando de forma satisfatória, estes controladores não conseguem lidar adequadamente com certos tipos de mudanças no processo. Além disso, também podem falhar, sendo os sistemas de AEM essenciais nesses casos.

Por um lado, a crescente complexidade e a crescente automação e instrumentação dos processos têm tornado os sistemas de AEM cada vez mais importantes. De outro lado, este mesmo incremento de automatização e instrumentação, juntamente com a evolução dos sistemas computacionais, têm tornado cada vez mais viável a aplicação de sistemas sofisticados de AEM. Esta viabilidade está baseada em quantidades crescentes de dados que estão disponíveis, e algoritmos cada vez mais complexos que podem ser implementados. No entanto, o número de trabalhos com aplicação em processos industriais é bastante discreto, sendo desprezível quando se trata de aplicações em uma planta industrial como um todo.

Levanta-se, então, a seguinte questão: para ocorrer o gerenciamento de eventos anormais de uma planta industrial de forma satisfatória é necessário ter sistemas de FDIAC atuando em todas as suas falhas? Não, é necessário que os sistemas de FDIAC atuem nas falhas prioritárias, existindo diversos critérios para priorizar as falhas de um sistema: segurança, custo, interesse gerencial, dentre outros. As técnicas de análise de riscos e confiabilidade têm se mostrado um poderoso instrumento para a tomada de decisões gerenciais, possibilitando a implementação das políticas que minimizam os custos de operação, manutenção e inspeção de sistemas industriais (Simões Filho, 2006). Desta forma, tem-se dado uma importância crescente a confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (*Reliability, Availability and Maintainability*, RAM) durante o projeto e a operação de sistemas industriais.

O objetivo da tese é desenvolver um sistema de detecção, diagnóstico e correção de falhas (FDIAC), que será aplicado a uma unidade de processamento de gás natural, utilizando técnicas de inteligência artificial e focando nas falhas do sistema de compressão do gás de venda. Nesta tese também será desenvolvida e aplicada uma nova metodologia que utiliza os fundamentos de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (RAM) como instrumento facilitador da FDIAC de plantas industriais.

De acordo com esta metodologia, um estudo prévio de RAM deve ser feito a partir dos dados de falha e reparo da operação da unidade industrial. Os indicadores de RAM são utilizados na seleção de prioridades dos problemas de FDIAC, fazendo com que tais problemas sejam abordados sob uma visão mais ampla do que o habitual. Posteriormente, será realizado o desenvolvimento dos sistemas de FDIAC para os problemas prioritários. A metodologia será aplicada a uma Unidade de Recuperação de Gás Natural (URGN) da Petrobras localizada no município de Pojuca na Bahia (URGN-3-Bahia), e o sistema de FDIAC será desenvolvido para o problema prioritário apontado: as falhas do sistema de compressão do gás de venda.

A escolha de uma unidade de processamento de gás como objeto de estudo para o desenvolvimento de um sistema de FDIAC tem forte apelo ambiental e econômico. O gás natural é um componente vital para o suprimento mundial de energia. Ele é considerado um dos tipos de energia mais limpos, eficientes e úteis, sendo utilizado nos campos residencial, comercial e industrial (Cheng *et al.*, 2009). Tratando-se de Brasil, a indústria de gás tem uma grande importância estratégica e econômica para o desenvolvimento do país. O processamento de gás natural tem como principal objetivo garantir a especificação do gás para os consumidores finais do produto. Assim como na maioria das indústrias do cenário atual, existe uma necessidade de produzir com alta qualidade, de reduzir as taxas de rejeição do produto e de satisfazer leis que regulamentam questões ambientais e de segurança do trabalho. As tecnologias de controle e AEM são aplicadas a processos a fim de se conseguir uma operação eficiente e segura, garantindo as necessidades anteriormente descritas. Como resultado da proposta de AEM, o *downtime* (tempo em que a planta não funcionou) é minimizado, a segurança da operação da planta é melhorada, e os custos de processamento são reduzidos (Chiang *et al.*, 2001). A implementação de um sistema de FDIAC pode também garantir o aumento da vida útil do processo e a extensão do seu ciclo de vida, já que, segundo Blázquez e Miguel (2005), a detecção precoce da ocorrência de falhas é um fator crítico para evitar deterioração de produtos, degradação de desempenho e danos materiais e humanos.

Os argumentos expostos revelam a importância de se desenvolver sistemas de AEM aplicados ao processamento de gás natural e a possibilidade de abrangência a

respeito das etapas destes sistemas. Desta forma fica configurada a relevância e viabilidade dos objetivos da tese que está sendo desenvolvida.

I.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO REALIZADO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, contando com esta introdução. Inicialmente é apresentada uma revisão bibliográfica sobre detecção, diagnóstico e correção de falhas em processos industriais. Esta revisão é composta pelo Capítulo II, que apresenta proposições das definições e terminologias da área, e pelo Capítulo III, onde é feito um panorama destas pesquisas no Brasil e no mundo. O Capítulo IV apresenta o sistema em estudo: o gás natural, a unidade de recuperação de gás natural e o sistema de compressão do gás de venda da unidade. As conclusões parciais e a descrição das atividades futuras estão apresentadas no capítulo final (V). O cronograma de acompanhamento das atividades futuras e a relação de publicações foram inseridos nos Anexos I e II, respectivamente. O desenvolvimento matemático de uma nova classe de distribuição de vida que será utilizada ao decorrer da tese foi apresentado no Apêndice A.

LISTA DE ABREVIATURAS

AEM	: <i>Abnormal Event Management</i> (gerenciamento de eventos anormais);
FDIAC	: <i>Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction</i> (detecção, diagnóstico (isolamento e análise) e correção de falhas);
RAM	: <i>Reliability, Availability and Maintainability</i> (confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade);
URGN	: Unidade de Recuperação de Gás Natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blázquez, L. F. & L. J. Miguel (2005). Additive fault detection in nonlinear dynamic systems with saturation. *ISA Transactions*, Vol. 44, pp 515-538;
- Cheng, S. R., B. Lin, B. M. Hsu & M. H. Shu (2009). Fault-tree analysis for liquefied natural gas terminal emergency shutdown system. *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp 11918–11924;

Chiang, L. H., E. L. Russel & R. D. Braatz (2001). Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems. 1a ed., *Springer*, London, UK;

Simões Filho, S. (2006). Análise de Árvore de Falhas Considerando Incertezas na Definição dos Eventos Básicos. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

Venkatasubramanian, V., R. Rengaswamy, K. Yin & S. N. Kavuri (2003). A review of process fault detection and diagnosis - Part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp 293-311.

CHAPTER II

Chapter II. Fault detection, diagnosis and correction in industrial processes: A consistent proposal of definitions and terminology

ABSTRACT

The increasing complexity of industrial systems and the consequent growth in instrumentation and process automation have given FDIAC - Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction - systems an increasingly important role. Together with this, the evolution of computer systems has enabled the application of sophisticated FDIAC systems because larger amounts of data are available and increasingly complex algorithms can be implemented. This chapter reflects on research into fault detection, diagnosis and correction through a critical analysis of the definitions and terminology used. The terminology and definitions that seem most appropriate for the research field, for its activities and for its object of study are proposed to conciliate the clash of visions of various authors, since this was not done yet by any work of literature. Furthermore, the most commonly studied industrial systems are highlighted as well as the most commonly used techniques in recent works with applications in these industrial problems.

KEYWORDS

fault detection, diagnosis and correction; industrial processes; concepts and definitions; terminology and standardization

CAPÍTULO II

Capítulo II. Detecção, diagnóstico e correção de falhas em processos industriais: Uma proposição consistente de definições e terminologias

RESUMO

A crescente complexidade dos sistemas industriais e o conseqüente aumento da automação e instrumentação dos processos têm tornado os sistemas de FDIAC - *Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction*; detecção, diagnóstico (isolamento e análise) e correção de falhas - cada vez mais importantes. Aliado a isso, a evolução dos sistemas computacionais tem tornado cada vez mais possível a aplicação de sistemas sofisticados de FDIAC, visto que quantidades cada vez maiores de dados estão disponíveis, e algoritmos cada vez mais complexos estão sendo possíveis de serem implementados. Neste capítulo é feita uma reflexão sobre a pesquisa em detecção, diagnóstico e correção de falhas, a partir de uma análise crítica das definições e terminologias utilizadas. Dessa forma, são propostas as terminologias e definições básicas que parecem mais apropriadas para a área, suas atividades básicas e seus objetos de estudo, a partir do confronto das visões de diversos autores, já que isto não foi feito até o momento por nenhum trabalho da literatura. Também são apontados os principais sistemas industriais investigados nos últimos anos para a resolução de problemas de FDIAC, e são averiguadas quais são as técnicas mais aplicadas na resolução destes problemas.

PALAVRAS-CHAVE

detecção, diagnóstico e correção de falhas; processos industriais; conceitos e definições; terminologia e normatização

II.1. INTRODUÇÃO

As tecnologias de controle e de gerenciamento de eventos anormais (*Abnormal Event Management*, AEM) são aplicadas a processos a fim de se conseguir uma operação eficiente e segura. Como resultado da utilização de AEM no processo, o *downtime* (tempo em que a planta não funcionou) pode ser minimizado, a segurança da operação da planta pode ser melhorada, e os custos de processamento podem ser reduzidos (Chiang *et al.*, 2001). Além disso, a implementação de um sistema de detecção, diagnóstico e correção de falhas (FDIAC) pode garantir o aumento da vida útil do processo e extensão do seu ciclo de vida já que, segundo Blázquez e Miguel (2005), a detecção precoce da ocorrência de falhas é um fator crítico para evitar deterioração de produtos, degradação de desempenho e danos materiais e humanos. Frank *et al.* (2000), Chiang *et al.* (2001) e Teixeira (2000) também chamam a atenção para a crescente importância destes sistemas, dada a crescente demanda para aumento de desempenho e qualidade, associada a uma maior eficiência econômica e ambiental, o que tem levado a um crescente crescimento da complexidade e do grau de automação dos processos e sistemas. Para se ter uma idéia do impacto econômico disso, na década de noventa estimava-se que somente a indústria petroquímica nos Estados Unidos gastava aproximadamente 20 bilhões de dólares em perdas devido a sistemas de monitoramento deficientes (Nimmo, 1995).

O amplo escopo coberto pelas atividades de diagnóstico faz com que esta tarefa seja difícil de ser realizada por operadores humanos de forma confiável. O tamanho e a complexidade das plantas modernas tornam esta tarefa ainda mais complicada. Plantas grandes podem ter milhares de variáveis de processo observadas e monitoradas a cada segundo. Além disso, a necessidade de diagnóstico rápido, aliada à insuficiência, incompletude e/ou desvio (erros) nas informações torna ainda mais difícil a realização destas tarefas pelo homem. Estatísticas industriais mostram que 70% dos acidentes são causados por erros humanos, o que, portanto, justifica a automação destas tarefas, o que é ressaltado também por Teixeira (2000).

Este estudo consiste de uma reflexão e uma proposição consistente de terminologias e definições da área de pesquisa em detecção, diagnóstico e correção de falhas em processos industriais, através do confronto entre as diferentes abordagens. Não é objetivo deste trabalho fazer uma revisão exaustiva dos artigos que empregam as técnicas de FDIAC, nem explicar detalhadamente como elas são aplicadas, pois este

tipo de estudo já foi realizado anteriormente por outros autores como, por exemplo, Frank e Koppen-Seliger (1997a, b), Leonhardt e Ayoubi (1997), Chiang *et al.* (2001), Venkatasubramanian *et al.* (2003a, b, c), Liao (2005), Nandi *et al.* (2005), Isermann (2006), Uraikul *et al.* (2007), dentre outros. Porém, uma contribuição adicional deste capítulo é apresentar estas técnicas com foco nas suas aplicações em problemas industriais e identificando os sistemas industriais mais investigados e as técnicas mais utilizadas nestes estudos.

Como citado acima, já existem diversos artigos de revisão (*reviews* ou *surveys*) consagrados e livros clássicos nesta área em língua inglesa. No entanto, a maioria destes trabalhos apenas descreve as diferentes técnicas de FDIAC e suas aplicações. Os poucos autores que fazem classificação das técnicas e definem a terminologia utilizada não justificam as diferenças entre a sua abordagem e a dos demais autores, não existindo um confronto ou consenso entre as diferentes propostas. No que diz respeito aos trabalhos em língua portuguesa, é desconhecida a existência de livros ou artigos de revisão nesta área. A maioria das teses e dissertações adota a classificação das técnicas e a terminologia apresentadas em trabalhos renomados em língua inglesa. No entanto, percebe-se que existe uma falta de consistência entre as traduções dos termos pelos diversos autores.

O entendimento das contribuições de diversos autores e a comparação entre as diferentes abordagens da área são prejudicados pela falta de consistência na terminologia utilizada nas pesquisas de detecção e diagnóstico de falhas. Mesmo após a publicação de sugestões de definições (IEC, 1990; ISO e IEC, 1993; Isermann e Ballé, 1997b), é possível perceber que esta deficiência ainda não foi sanada.

Se a terminologia utilizada na língua inglesa não é consistente, uma inconsistência ainda maior é percebida quando se trata da terminologia utilizada na língua portuguesa. A falta de trabalhos que discutam essa deficiência em língua portuguesa faz com que traduções diferentes para os mesmos termos sejam utilizadas por diferentes autores, propagando o problema cada vez mais.

Definições sobre termos utilizados na área de “gerenciamento de eventos anormais” (*Abnormal Event Management*, AEM) estão presentes na maioria dos trabalhos existentes. A falta de consistência dos termos da área já foi evidenciada e sugestões com o objetivo de padronizar as definições foram feitas (IEC, 1990; ISO e

IEC, 1993; Isermann e Ballé, 1997b). Entretanto, nenhum trabalho até o momento confrontou as abordagens de diferentes autores.

IEC (1990), um trabalho da Comissão Internacional de Eletrotécnica (*International Electrotechnical Commission, IEC*), definiu os termos correlacionados com as falhas no âmbito da qualidade de serviços de natureza eletrotécnica. Posteriormente, ISO e IEC (1993), um trabalho da Organização Internacional de Padronização (*International Organization for Standardization, ISO*) juntamente com a IEC, tiveram o objetivo de suprir necessidades da área de tecnologia da informação. Este trabalho explicita ao longo do seu texto as suas diferenças em relação à IEC (1990). Isermann e Ballé (1997b) é um trabalho gerado a partir de discussões feitas no âmbito do Comitê Técnico SAFEPROCESS (*Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*; Simpósio em Detecção de Falhas, Supervisão e Segurança de Processos Técnicos) da IFAC (*International Federation of Automatic Control, Federação Internacional de Controle Automático*). A grande diferença entre as definições das normas e dos artigos é explicada pelo histórico da área, que foi iniciada como uma atividade da área de manutenção (pertencente à área de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade; *Reliability, Availability and Maintainability*; RAM) e atualmente é realizada em grande parte pela operação, sendo vista na maioria dos casos como uma sub-área ou um campo do controle de processos.

Em português, a grande questão está na tradução dos termos. Enquanto que em inglês já foram escritos alguns trabalhos com o objetivo de definir os termos usados na área de FDIAC, em português existe apenas a versão da IEC (1990): a ABNT (1994), um trabalho da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Como esta norma é ligada à área de manutenção, a tradução dos termos algumas vezes não é a mesma que a utilizada nos diversos trabalhos escritos por autores com origem na área de controle de processos.

O objetivo deste capítulo é fazer uma análise crítica das definições e terminologias utilizadas na área de detecção, diagnóstico e correção de falhas, recomendando as formas mais apropriadas e adequadas a serem utilizadas, especialmente em língua portuguesa, enfatizando ainda as técnicas mais utilizadas nas diferentes aplicações industriais. A partir do confronto das visões de diversos autores são estabelecidos o conceito, a definição e a terminologia da área de pesquisa, na seção II.2, as terminologias, definições básicas e conceitos dos seus objetos de estudo, na

seção II.3, as principais tarefas de sistemas de AEM, na seção II.4, e os tipos de falhas na seção II.5. Na seção II.6, são apresentadas as principais áreas de aplicações em problemas industriais, bem como as técnicas que mais têm sido utilizadas, e na seção II.7 são apresentadas as conclusões e comentários finais do capítulo.

II.2. CONCEITO E DENOMINAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

Em processos industriais, existem muitas denominações para o sistema que objetiva assegurar o sucesso das operações planejadas através do reconhecimento de anomalias no comportamento do processo e da assistência para a tomada de ações de correção. Para denominar este tipo de sistema, podem ser encontrados os termos “diagnóstico de falhas” (Frank *et al.*, 2000; Patton, 1993), “detecção de falhas” (Willisky, 1976) e “detecção e diagnóstico de falhas” (Gertler, 1988; Isermann, 1997a; Isermann e Ballé, 1997b; Venkatasubramanian *et al.*, 2003a). O último termo é o mais utilizado na literatura, inclusive em língua portuguesa (como, por exemplo, em Tinós, 1999; Fernandes, 2007; Rivera, 2007; Teixeira, 2000; Palma *et al.*, 2002), e será adotado neste trabalho.

As siglas utilizadas são, na maioria dos casos, formadas pela abreviação das atividades ou etapas que fazem parte deste sistema. Para representar o termo “detecção e diagnóstico de falhas” (*fault detection and diagnosis*) muitos autores utilizam a sigla FDD (Rueda *et al.*, 2005; Zogg *et al.*, 2006; Isermann, 2006) ou, quando em português, DDF (Tinós, 1999; Fernandes, 2007). Alguns poucos autores utilizam FDIA (em inglês: Frank *et al.*, 2000; em português: Palma *et al.*, 2002) ao invés de FDD, já que para eles o diagnóstico de falhas consiste nas tarefas de isolamento ou isolação (*Isolation*, I) e análise (*Analysis*, A) das falhas.

A maioria dos sistemas reais contém apenas as etapas de detecção e isolamento das falhas (*fault detection and isolation*) (Palma *et al.*, 2002). Essas etapas são também o foco da maior parte dos artigos (Frank, 1990; Fernandes, 2007), sendo que estes utilizam as siglas FDI ou DIF (em língua portuguesa) para representá-las. Desta forma, mesmo sendo a de menor utilização, sugerimos FDIA ao invés de FDD com o objetivo de abranger a sigla que mais aparece na literatura (FDI).

A detecção e o diagnóstico de falhas podem ser acoplados às ações de correção das falhas, formando um sistema mais abrangente. Este sistema e, conseqüentemente, sua área de pesquisa foram nomeados de “gerenciamento de eventos anormais”

(*Abnormal Event Management*, AEM) por Venkatasubramanian *et al.* (2003a) e de “monitoramento de processos” (*process monitoring*) por Chiang *et al.* (2001).

O uso da expressão “monitoramento de processos” pode causar confusões, pois esta já é amplamente utilizada em controle de processos, e alguns autores (por exemplo, Teixeira, 2000) utilizam-na como sinônimo da própria atividade de detecção de falhas, que é apenas uma das etapas desta área de pesquisa. Sendo assim, propomos a adoção da nomenclatura “gerenciamento de eventos anormais” para denominar a área de pesquisa que estamos tratando. Propomos também a sigla FDIAC para representar o conjunto mais amplo das tarefas desta área, que é composto por detecção (D), diagnóstico (isolamento e análise, IA) e correção (C) de falhas (F) (a fim de evitar uma profusão desnecessária de siglas, sugerimos utilizar aquelas oriundas dos termos em inglês, já que elas são internacionalmente conhecidas). Mesmo sabendo que o termo AEM representa melhor a idéia global da área, enquanto que o termo FDIAC representa o conjunto de suas tarefas, o uso indistinto destes dois termos para se referir ao sistema e à área de pesquisa em estudo não representa contradições nem problemas de interpretação. As denominações da área de pesquisa e das sub-áreas constituídas de algumas de suas principais tarefas estão resumidas no Quadro II.1.

Quadro II.1. Denominação da área de pesquisa

Termo em inglês	Termo em português	Sigla	Definição / Conceito
<i>Fault detection and isolation</i>	Detecção e isolamento de falhas	FDI	Sistema que contém apenas as etapas de detecção e isolamento das falhas. A maioria dos sistemas reais atuais é deste tipo.
<i>Fault detection and diagnosis</i>	Detecção e diagnóstico de falhas	FDIA	Sistema que objetiva assegurar o sucesso das operações planejadas através do reconhecimento de anomalias no comportamento do processo e da assistência para a tomada de ações de correção.
<i>Abnormal event management</i> ou <i>Fault detection diagnosis and correction</i>	Gerenciamento de eventos anormais ou Detecção, diagnóstico e correção de falhas	AEM ou FDIAC	Sistema, e sua respectiva área de pesquisa, que objetiva assegurar o sucesso das operações planejadas através do reconhecimento de anomalias no comportamento do processo e das ações de correção. Consiste nas tarefas de detecção, diagnóstico e correção de falhas.

II.3. DEFINIÇÕES DOS OBJETOS DE ESTUDO DA ÁREA

Esta seção trata dos termos relacionados aos objetos de estudo da área de AEM. Existe na literatura muita contradição e/ou superposição de definições e terminologias

em relação a estes termos. Há também muitas inconsistências nas traduções da terminologia para a língua portuguesa. Assim, a principal contribuição desta seção é propor uma tradução para a língua portuguesa e uma definição dos termos *failure*, *fault*, *defect*, *malfunction*, *error* e *mistake* que resolva estas contradições e/ou superposições, após a análise crítica das diferentes terminologias utilizadas na área e encontradas na literatura. Outra contribuição original é mostrar de forma clara a correlação existente entre todos estes objetos.

II.3.1. EVENTO DE FALHA (*FAILURE*)

O termo *failure* é definido como o término da capacidade de desempenhar a função requerida sob condições especificadas (IEC, 1990; ISO e IEC, 1993; Isermann e Ballé, 1997b). Este termo é amplamente utilizado na área de RAM e a sua tradução para o português nesta área é “falha” (ABNT, 1994).

Nas pesquisas na área de AEM, a denominação *failure* não é muito utilizada. Este termo sugere uma parada completa ou incapacidade total, sendo associado pelos diversos autores ao termo *breakdown*. Na maioria das vezes, este termo aparece apenas na parte das definições dos trabalhos e/ou quando o termo *fault* é explicado, aparecendo ora como causa (Venkatasubramanian *et al.*, 2003a) ora como consequência (ISO e IEC, 1993) de *fault*. O termo *failure* também pode ser encontrado como sinônimo de *fault*, com o argumento de simplificação no uso da terminologia (Gertler, 1988).

Nos textos de AEM em língua portuguesa, o termo “defeito” é mais encontrado do que o termo “falha” como o equivalente de *failure*.

II.3.2. ESTADO DE FALHA (*FAULT*)

Uma parte dos trabalhos de AEM define *fault* como sendo o **estado** caracterizado pela perda da capacidade de desempenhar a função requerida sob condições especificadas. Outro conjunto de trabalhos define este mesmo termo como sendo as **mudanças** que conduzem a este estado.

Himmelblau (1978), IEC (1990) e Venkatasubramanian *et al.* (2003a) são exemplos de trabalhos que tratam o termo *fault* de acordo com a primeira definição (**estado**). Já ISO e IEC (1993), Frank (1990) e Isermann (1984, 1997a), dentre outros, tratam o termo *fault* como sendo a causa da perda de desempenho (**mudanças**). Alguns destes autores associam os termos “condição anormal” (*abnormal condition*), “mau

funcionamento” (*malfunction*) e “desvio” (*deviation* ou *departure*) ao termo em questão.

Propomos aqui a primeira definição deva ser adotada, já que a idéia de estado é mais bem relacionada com o termo “sintoma” (*symptom*), que é normalmente utilizado quando se trata de processos. De forma aderente a esta linha de pensamento, poder-se-ia também definir *fault* como sendo todo evento no qual uma variável observada ou um parâmetro calculado, associado a um processo, sai de um dado intervalo aceitável (Himmelblau, 1978).

Alguns trabalhos (Isermann, 1984; IEC, 1990) restringem *fault* no sentido de perda total (incapacidade) da capacidade funcional. Contudo, é mais abrangente considerar o estado de perda como sendo total ou parcial (redução da capacidade), desde que seja inaceitável (ISO e IEC, 1993; Isermann, 1997a; Tinós, 1999; Fernandes, 2007).

Na área de FDIAC, *fault* vem sendo traduzido como “falha” e *failure* como “defeito”. No entanto, a área de RAM utiliza há mais tempo o termo “falha” para traduzir *failure*. Como estas áreas têm interesses em comum, não é recomendável que existam discordâncias entre os termos e definições propostos nestas duas áreas. Por isso, ABNT (1994) utilizou “falha” para a tradução de *failure* e *fault* foi traduzido como “pane”.

Proposto há mais de 10 anos, o termo “pane” ainda não é usado por trabalhos da área de AEM, sendo que a maioria dos autores até mesmo desconhece o seu uso para traduzir *fault*. Se nem mesmo uma publicação normativa da ABNT conseguiu mudar o emprego do termo “falha”, dificilmente a utilização de outro termo irá ser feita pelos pesquisadores da área. No entanto, como os termos têm definições diferentes é necessário propor traduções distintas para eles. De acordo com o que foi proposto anteriormente, *failure* é um evento e *fault* um estado. Propõe-se então os termos “evento de falha” e “estado de falha” ou “pane”, respectivamente, quando for necessário diferenciar os termos. Apesar desta diferenciação, os termos *fault* e *failure* estão intimamente ligados, sendo que é possível relacionar as mesmas atividades aos dois termos (por exemplo: detecção de falha). Assim, nem sempre esta diferenciação precisa estar explícita, podendo ser utilizado apenas o termo “falha”. O importante é que o sentido do emprego do termo esteja claro, sendo recomendada a utilização das terminologias diferenciadas em contextos que possam deixar alguma dúvida.

É importante ressaltar que, além da questão didática, os principais objetivos de definir os termos da área são: o entendimento correto do que se lê e a utilização adequada dos termos quando se escreve. O estado de falha (*fault*) é geralmente resultado de um evento de falha (*failure*). Este estado pode existir também sem um evento anterior, como nos casos de perda parcial da capacidade funcional e das falhas de projeto.

As causas subjacentes ao evento e ao estado de falha são chamadas de eventos básicos (*basic events*) ou causas-raiz (*root causes*), ou simplesmente de causas da falha (Venkatasubramanian *et al.*, 2003a). Um sistema pode ter uma composição hierárquica de vários níveis (subsistemas). Desta forma, a falha de um dado subsistema pode ser a causa da ocorrência de uma falha em um sistema mais abrangente (ISO e IEC, 1993).

II.3.3. DEFEITO (*DEFECT*)

ABNT (1994) traduz *defect* como defeito e o define como qualquer desvio de uma característica em relação aos seus requisitos. O defeito pode, ou não, afetar a capacidade de desempenhar uma função requerida (ocasionar uma falha). *Defect* não é muito encontrado na literatura de AEM e, em português, quando se encontra o termo “defeito” normalmente está sendo utilizado como tradução de *failure*.

II.3.4. MAU FUNCIONAMENTO (*MALFUNCTION*)

Malfunction, ou mau funcionamento em português, é uma irregularidade intermitente no preenchimento de uma função requerida do sistema (Isermann e Ballé, 1997b). Embora este termo apareça com certa regularidade na literatura da área, a única definição formal encontrada para o mesmo foi esta mencionada acima. Em virtude do paralelo que podemos traçar deste termo com o termo *failure*, como será visto adiante, é necessária uma definição um pouco mais abrangente, sem a obrigatoriedade da qualificação “intermitente”, que é a definição que adotamos aqui: irregularidade, intermitente ou não, no preenchimento de uma função requerida do sistema.

II.3.5. ERRO/ ENGANO (*ERROR / MISTAKE*)

Error é um termo bastante utilizado em todos os ramos das ciências exatas, sendo que sua tradução para o português é “desvio”. Como existem diversos tipos de erros, é importante que seja descrita a sua definição para a área que estamos tratando.

Sendo assim, o erro é um desvio (diferença) entre um valor medido/calculado ou uma condição observada e a correspondente condição ou valor verdadeiro, especificado ou teoricamente correto (ABNT, 1994; Isermann e Ballé, 1997b). O erro pode ser causado por uma falha do sistema.

Este termo pode também designar um erro humano, um engano, comumente chamado de *mistake*. ISO e IEC (1993) definem *mistake* como a ação humana, ou falta desta, que produz um resultado diferente daquele que se pretendia ou que se deveria obter.

II.3.6. CORRELAÇÃO EXISTENTE ENTRE OS OBJETOS DE ESTUDO DE AEM

Após a análise crítica das diferentes terminologias utilizadas na área, os termos adotados e recomendados estão reunidos no Quadro II.2, juntamente com as suas definições mais apropriadas.

Quadro II.2. Objetos de estudo da área de pesquisa

Termo em inglês	Termo em português	Definição / Conceito
<i>Failure</i>	Evento de falha	Término da capacidade de desempenhar a função requerida sob condições especificadas. Sugere uma parada completa ou incapacidade total.
<i>Fault</i>	Estado de falha ou Pane	Estado caracterizado pela perda (total ou parcial) da capacidade de desempenhar a função requerida sob condições especificadas.
<i>Basic events</i> ou <i>Root causes</i> ou <i>Fault causes</i>	Eventos básicos ou Causas-raiz ou Causas da falha	As causas subjacentes ao evento e ao estado de falha.
<i>Defect</i>	Defeito	Qualquer desvio de uma característica em relação aos seus requisitos. Pode, ou não, afetar a capacidade de desempenhar uma função requerida (ocasionar uma falha).
<i>Malfunction</i>	Mau funcionamento	Irregularidade, intermitente ou não, no preenchimento de uma função requerida do sistema.
<i>Error</i>	Erro	Desvio (diferença) entre um valor medido/calculado ou uma condição observada e a correspondente condição ou valor verdadeiro, especificado ou teoricamente correto. Pode ser causado por uma falha do sistema.
<i>Mistake</i>	Erro humano ou Engano	Ação humana, ou falta desta, que produz um resultado diferente daquele que se pretendia ou que se deveria obter.

Figura II.1 apresenta de uma forma original, para um mesmo nível hierárquico de subsistema, a relação de causa e efeito dos termos tratados nesta seção. Um evento que leva ao estado de falha (*fault*) pode acontecer no sistema. Se este estado foi caracterizado pela perda total da capacidade funcional, o evento anterior ao estado de falha é uma *failure* (evento de falha). No entanto, se a perda da capacidade funcional foi parcial, um mau funcionamento foi o que ocorreu anteriormente. As causas subjacentes ao evento de falha ou mau funcionamento e ao estado de falha são chamadas de causas-raiz (*root causes*). Dentre as diversas causas possíveis, estão o defeito (*defect*) e o engano (*mistake*). Tanto o estado de falha como as suas causas são percebidos através dos sintomas. Um dos sintomas mais conhecidos é o erro. O conjunto de sintomas, por sua vez, é uma das entradas das etapas de detecção e diagnóstico de falhas (Figura II.2).

É importante ressaltar que, embora não esteja representado, o erro, o engano e o defeito podem também acontecer sem estarem relacionados à existência de falhas no sistema.

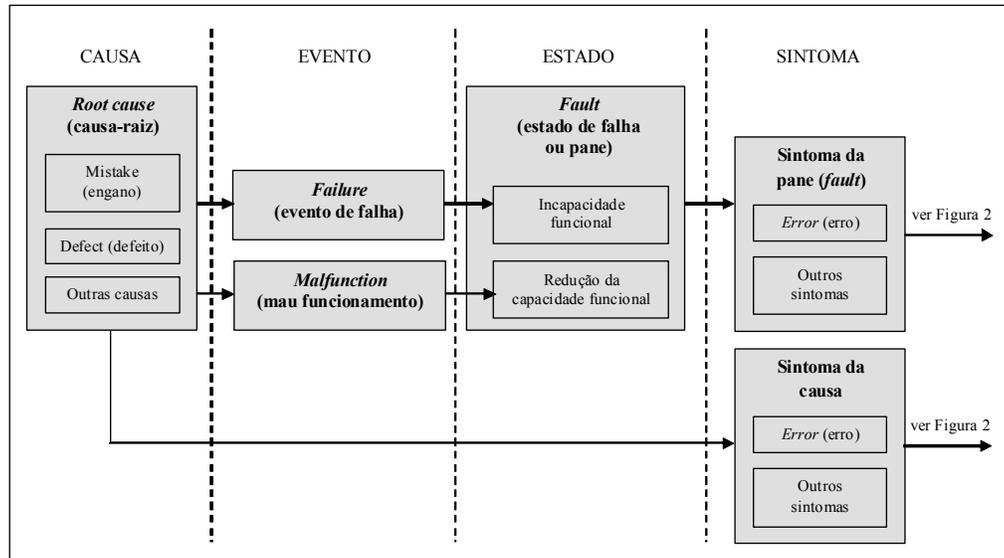


Figura II.1. Correlação entre os objetos de estudo da área de pesquisa.

II.4. PRINCIPAIS TAREFAS DE SISTEMAS DE AEM

Existem diversos métodos utilizados na literatura para se construir um sistema de AEM. Cada método tem suas etapas específicas, que não serão aqui abordadas. O objetivo desta seção é abordar as tarefas ou atividades comuns à maioria dos sistemas de AEM, independente do método utilizado. As principais contribuições desta seção são propor a terminologia adequada e uma definição abrangente e consistente para cada destas tarefas ou atividades, o que inclui especificar de forma clara e inequívoca quais são as suas variáveis de entrada e de saída, já que aqui também observa-se contradições e superposições na literatura.

II.4.1. DETECÇÃO DE FALHAS

Detecção de falhas (*fault detection*) é a determinação da presença de uma falha no sistema e do tempo de detecção (Isermann e Ballé, 1997b; Frank *et al.*, 2000; Venkatasubramanian *et al.*, 2003a). Esta etapa indica, em certo tempo, que algo está errado com o sistema, que existe um comportamento indesejável ou inaceitável.

Alguns autores não associam a determinação do tempo de detecção a esta etapa e sim à etapa seguinte, a de diagnóstico (Gertler, 1988; IEC, 1990; Chiang *et al.*, 2001). No entanto, não compartilhamos desta classificação. Dificilmente irá se determinar a ocorrência da falha sem que se possa conhecer o tempo em que foi realizada esta determinação.

Esta etapa também é chamada de monitoramento/monitoração por alguns autores (Isermann, 1984; Teixeira, 2000). Além deste termo, IEC (1990) usa também o termo “supervisão” com o mesmo sentido. Não recomendamos a utilização destes termos devido à confusão que podem causar por serem termos amplamente usados na área de controle de processos, como já mencionado anteriormente.

A detecção de falhas é realizada através do registro de informações, do reconhecimento e da indicação de anormalidades no comportamento do sistema em um tempo determinado (Isermann e Ballé, 1997b). Essa operação pode ser feita através de diversas formas, desde o simples acompanhamento de alguma variável do sistema até a análise da diferença (chamada de resíduo) entre o valor medido de uma variável e o seu respectivo valor estimado por um modelo matemático (chamada de detecção de falhas com redundância analítica) ou medido por um instrumento extra que realiza uma medida equivalente (chamada de detecção de falhas com redundância física ou de *hardware*).

II.4.2. DIAGNÓSTICO DE FALHAS

O diagnóstico de falhas (*fault diagnosis*) é a determinação das características das falhas detectadas. Essas características variam de acordo com o objetivo de cada sistema, sendo que a localização e a causa são as mais corriqueiramente abordadas na literatura. De forma abrangente, o diagnóstico de falhas pode determinar o tipo, a localização, o tamanho (magnitude), a causa, o instante e o comportamento com o tempo (Isermann e Ballé, 1997b; Venkatasubramanian *et al.*, 2003a). Alguns autores dizem que o tempo de detecção é determinado nesta etapa, ao invés do tempo de ocorrência da falha (Isermann e Ballé, 1997b). Como colocado anteriormente, consideramos que a determinação do tempo de detecção é uma atividade da própria detecção, ficando a cargo da tarefa de diagnóstico a determinação do tempo de ocorrência da falha (Isermann e Ballé, 1997b; Venkatasubramanian *et al.*, 2003a). Vale

ressaltar que estes tempos não são a mesma coisa, visto que pode existir uma diferença de tempo entre a ocorrência do evento de falha e a sua detecção.

O diagnóstico de falhas pode ser dividido nas etapas de isolamento e análise das falhas. Na etapa de isolamento ou classificação (*fault isolation or classification*) são definidos o tipo, a localização e o tempo de ocorrência da falha, e seu objetivo é determinar o estado de falha existente. Alguns autores, por exemplo Frank *et al.* (2000), consideram que a definição do tipo da falha faz parte da etapa seguinte (análise). No entanto, não nos parece adequada a classificação de Frank e colaboradores, uma vez que o objetivo do isolamento é determinar o estado de falha existente.

A tarefa de análise ou identificação de falha (*fault analysis or identification*) é definida como todo detalhamento posterior da falha (definição do tamanho, da causa, do comportamento com o tempo, dentre outros) (Gertler, 1988; Isermann e Ballé, 1997b; Frank *et al.*, 2000). Seu objetivo é avaliar a origem da falha e seu impacto no desempenho do sistema (Fernandes, 2007). Chiang *et al.* (2001), por sua vez, definem esta tarefa como diagnóstico de falha e utilizam o termo identificação de falha para se referirem ao procedimento de determinação das variáveis observadas mais relevantes. Segundo estes autores, o objetivo deste procedimento é focalizar a atenção dos operadores e engenheiros nos subsistemas mais pertinentes para a determinação da falha. Como este procedimento não é a única maneira utilizada para facilitar o diagnóstico de falhas (Raich e Çinar, 1996), e como acreditamos que ele é normalmente realizado dentro da etapa de isolamento, concluímos que não é necessário considerá-lo como uma etapa separada.

II.4.3. CORREÇÃO DE FALHAS

A etapa de correção de falhas (*fault correction*) consiste da tomada de ações apropriadas (parada, mudanças na operação, reconfiguração, manutenção ou reparo do sistema), de forma automática ou não, para restabelecer a capacidade de desempenhar a função requerida (ISO e IEC, 1993). Essa etapa é também chamada de recuperação do processo (*process recovery*) ou intervenção (*intervention*) (Chiang *et al.*, 2001). Venkatasubramanian *et al.* (2003a) consideram as ações de correção como sendo ações de controle supervisorio já que, assim como outros autores, eles consideram AEM como um componente-chave do controle supervisorio. Dependendo da falha diagnosticada, as seguintes ações de correção podem ser realizadas (Isermann, 2006):

- a. Operação segura (por exemplo: parada da planta);
- b. Operação confiável (mudanças na operação);
- c. Reconfiguração (utilizando outros sensores, atuadores ou componentes redundantes);
- d. Manutenção;
- e. Reparo.

II.4.4. CORRELAÇÃO EXISTENTE ENTRE AS PRINCIPAIS ATIVIDADES DE UM SISTEMA DE AEM

As atividades básicas anteriormente descritas estão resumidas no Quadro II.3.

Quadro II.3. Principais atividades de sistemas de AEM

Termo em inglês	Termo em português	Definição / Conceito
<i>Fault detection</i>	Detecção de falhas	Determinação da presença de uma falha no sistema e do tempo de detecção. Indica, em certo tempo, que algo está errado com o sistema, que existe um comportamento indesejável ou inaceitável.
<i>Fault isolation</i> ou <i>fault classification</i>	Isolamento de falhas ou classificação de falhas	Definição de tipo, localização e tempo de ocorrência da falha. Seu objetivo é determinar o estado de falha existente. É uma das duas etapas do diagnóstico de falhas.
<i>Fault identification</i> ou <i>fault analysis</i>	Identificação de falhas ou análise de falhas	Definição do tamanho, da causa e do comportamento com o tempo da falha, dentre outros. Seu objetivo é avaliar a origem da falha e seu impacto no desempenho do sistema. É uma das duas etapas do diagnóstico de falhas.
<i>Fault diagnosis</i>	Diagnóstico de falhas	Junção das etapas de isolamento e análise das falhas. Determinação das características (tipo, localização, tamanho, causa, comportamento com o tempo, tempo de ocorrência, etc.) das falhas detectadas.
<i>Fault correction</i> ou <i>process recovery</i> ou <i>intervention</i>	Correção de falhas ou recuperação do processo ou intervenção	Tomada, automática ou não, de ações apropriadas (parada, mudanças na operação, reconfiguração, manutenção ou reparo do sistema) para restabelecer a capacidade do sistema de desempenhar a função requerida.

Nos sistemas de AEM, de forma geral, primeiramente a falha é detectada para depois serem realizadas as tarefas de isolamento e análise (diagnóstico) da falha. O diagnóstico de falhas fornece então assistência para a tomada de ações de correção e, desta maneira, após as correções terem sido realizadas, a capacidade de desempenhar a função requerida é restabelecida. A Figura II.2 ilustra as principais atividades que foram descritas para um sistema de AEM. Além da estrutura mostrada na Figura II.2, também é comum encontrar as tarefas de detecção e diagnóstico sendo realizadas em uma etapa única, ao invés de duas etapas distintas (Raich e Çinar, 1996).

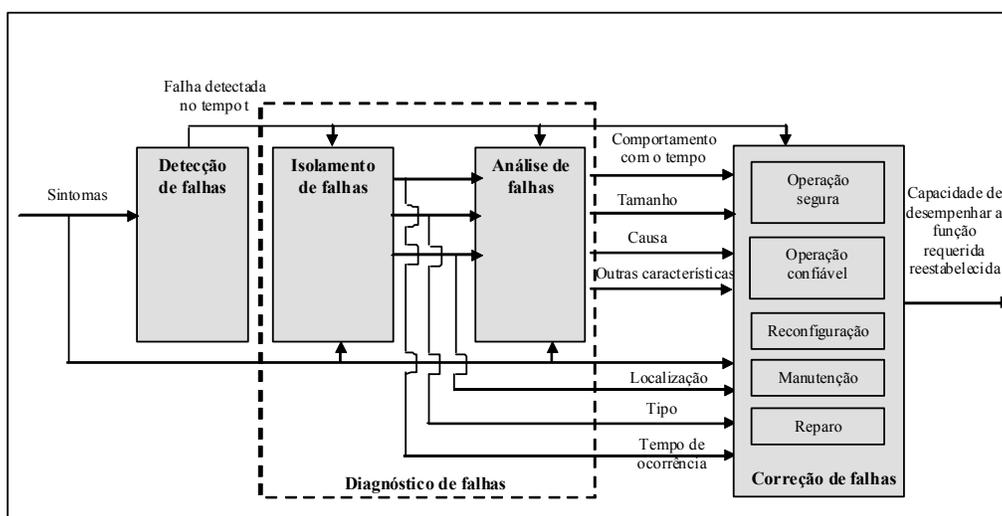


Figura II.2. Principais atividades de sistemas de AEM.

II.5. TIPOS DE FALHAS

Na maioria dos casos, a classificação das panes (ou estados de falha) reflete, de forma explícita ou implícita, a visão dos autores a respeito da estrutura dos sistemas de detecção e diagnóstico (Gertler, 1988). Os tipos de panes surgem de acordo com as diferentes considerações feitas. Embora a maioria das definições aqui descritas sejam encontradas de forma dispersa na literatura, a principal contribuição desta seção é justamente reunir todas elas em uma única fonte, mostrando os diferentes critérios sob os quais elas são classificadas.

De acordo com o local de ocorrência, Chiang *et al.* (2001), Frank (1990) e Venkatasubramanian *et al.* (2003a) classificam os estados de falha nos seguintes tipos:

- Mudanças nos parâmetros do processo: surgem quando há um distúrbio atuando

no sistema, a partir de uma ou mais variáveis exógenas (cuja dinâmica não está relacionada ao processo);

- Mudanças estruturais ou pane de componente (*component fault*): ocorrem nos componentes do processo (equipamentos) e resultam em mudanças no fluxo de informações entre várias variáveis;
- Pane de instrumento (*instrument fault*): ocorre nos sensores (instrumentos) do processo;
- Pane de atuador (*actuator fault*): ocorre nos atuadores do processo.

Considerando-se o tipo de sinal da pane (ou estado de falha), existem as seguintes categorias de classificação (Gertler, 1988; Isermann, 1997a e Palma *et al.*, 2002):

- Panes aditivas (*additive faults*): afetam o sinal de resíduo, somando um valor às entradas e/ou às saídas do sistema. Podem ser divididas em panes aditivas de medida (*additive measurement faults*) e panes aditivas de processo (*additive process faults*). O primeiro tipo se refere às diferenças entre as medidas das variáveis e os valores reais (relacionado aos sensores) ou entre o valor pretendido e o realizado (relacionado aos atuadores). O segundo tipo são distúrbios (entradas desconhecidas) agindo sobre o sistema;
- Panes multiplicativas (*multiplicative faults*) ou paramétricas: afetam o sinal de resíduo, sendo um produto dos termos do estado ou do controle com os desvios dos parâmetros. São mudanças (abruptas ou graduais) de parâmetros do processo. Tais panes descrevem melhor a deterioração de equipamentos, tal como perda de potência, perda de capacidade de troca térmica, perda de eficiência, entre outros.

Em relação à sua evolução temporal, as panes (ou estados de falha) foram classificadas por Isermann (1997a) em três tipos:

- Panes abruptas (*abrupt fault* ou *stepwise*): ocorrem com mudanças rápidas nas variáveis do processo (Rivera, 2007). Surgem quando há um distúrbio atuando diretamente no processo, a partir das vizinhanças, através de uma ou mais

variáveis exógenas (Teixeira, 2000). Palma *et al.* (2002) usam o termo “falhas rápidas” para designar este tipo de pane;

- Panes incipientes (*incipient fault* ou *drift-like*) (Tinós, 1999): ocorrem de modo gradual, evoluindo lentamente com o transcorrer do tempo. Ocasionalmente causam perda de desempenho do sistema e fadiga nos componentes sobrecarregados. Muitas vezes os efeitos destas panes são encobertos pela ação dos controladores envolvidos, sendo, portanto, difíceis de serem detectadas. São chamadas de falhas lentas por Palma *et al.* (2002);
- Pane intermitente (*intermittent fault*): são aquelas que aparecem e desaparecem no transcorrer do tempo, sem que ocorra qualquer ação de correção (ABNT, 1994).

Teixeira (2000) também classifica as panes (ou estados de falha), de acordo com o conhecimento que se tem sobre elas, nas seguintes categorias:

- Panes esperadas ou familiares;
- Panes desconhecidas.

Em ABNT (1994) são encontrados outros diversos tipos de pane (ou estado de falha), que foram definidos de acordo com os seguintes critérios:

- Conseqüência da pane: pane crítica, pane não-crítica, pane maior, pane menor, pane completa e pane parcial;
- Causa da pane: pane por uso incorreto, pane por manuseio, pane por fragilidade, pane de projeto, pane de fabricação, pane por deterioração e pane sistemática;
- Percepção da pane: pane evidenciada por programa, pane evidenciada por dados e pane latente;
- Resposta da pane: pane determinada e pane indeterminada;
- Ocorrência da pane: pane permanente e pane temporária.

É importante ressaltar que, embora seja interessante classificar os estados de falha do ponto de vista analítico e didático, é natural que as categorias propostas não

consigam descrever algumas situações reais, ocasionando a falta de utilidade prática de algumas destas classificações (Gertler, 1988).

II.6. TÉCNICAS DE FDIAC

A necessidade de lidar com um grande número de dados de falha ou com a ausência de dados bem definidos, aliada ao aumento da complexidade das plantas industriais e das exigências de segurança pessoal e ambiental, tem levado à utilização de técnicas cada vez mais específicas e/ou sofisticadas.

De acordo com Venkatasubramanian *et al.* (2003a), os métodos para diagnóstico de falhas podem ser classificados com base no conhecimento *a priori* utilizado (Quadro II.4). Assim, a abordagem utilizada pode envolver métodos baseados em modelos ou no histórico do processo, sendo em ambos os casos divididos em métodos quantitativos e qualitativos.

Dentre as técnicas utilizadas nos métodos baseados em modelos quantitativos, algumas usam redundância analítica para a geração de resíduos: observadores de estados e de saídas, equações e espaço de paridade, filtro de Kalman estendido (*Extended Kalman Filter*, EKF) e identificação e estimação de parâmetros. No caso dos métodos baseados em modelos qualitativos, é possível citar: árvores de falha, simulação qualitativa (*Qualitative SIMulation*, QSIM), teoria qualitativa de processo (*Qualitative Process Theory*, QPT) e grafos direcionados por sinais (*Signed Directed Graph*, SDG) (Isermann 1997a; Isermann e Ballé, 1997b; Venkatasubramanian *et al.*, 2003b). Os métodos baseados no histórico do processo podem utilizar técnicas com abordagem qualitativa, como os sistemas especialistas (*Expert System*, ES) e a análise qualitativa de tendências (*Qualitative Trend Analysis*, QTA), ou quantitativa, como os classificadores estatísticos, as redes neurais (*Neural Networks*, NN), a análise de componentes principais (*Principal Component Analysis*, PCA) e o método dos mínimos quadrados parciais (*Partial Least Squares*, PLS) (Blázquez e Miguel, 2005; Venkatasubramanian *et al.*, 2003c; Teixeira, 2000).

Quadro II.4. Classificação das técnicas com base no conhecimento *a priori* utilizado

Modelos		Histórico do Processo	
Quantitativos	Qualitativos	Quantitativos	Qualitativos
Observadores de estados e de saídas	Árvores de falha	Classificadores estatísticos	Sistemas especialistas (ES, <i>Expert System</i>)
Equações e espaço de paridade	Simulação qualitativa (QSIM, <i>Qualitative SIMulation</i>)	Redes neurais (NN, <i>Neural Networks</i>)	Análise qualitativa de tendências (QTA, <i>Qualitative Trend Analysis</i>)
Filtro de Kalman estendido (EKF, <i>Extended Kalman Filter</i>)	Teoria qualitativa de processo (QPT, <i>Qualitative Process Theory</i>)	Análise de componentes principais (PCA, <i>Principal Component Analysis</i>)	
Identificação e estimação de parâmetros	Grafos direcionados com sinais (SDG, <i>Signed Directed Graph</i>)	Método dos mínimos quadrados parciais (PLS, <i>Partial Least Squares</i>)	

No período compreendido entre 2004 e 2009 foram publicados, na área de detecção e diagnóstico de falhas, aproximadamente 430 artigos em periódicos indexados com aplicações em problemas industriais, que serão a base das análises apresentadas nesta seção, no texto que segue, no Quadro II.5 e no Quadro II.6.

Diversas técnicas de detecção e diagnóstico de falhas foram utilizadas nos 430 artigos referidos anteriormente, destacando-se as técnicas de base estatística e o uso crescente da inteligência artificial. Mais de 20 técnicas foram aplicadas de forma bem distribuída, o que explica o fato de pouco mais da metade de todos os artigos encontrados contemplar o conjunto das técnicas mais utilizadas, que são as seguintes, em ordem decrescente de utilização: redes neurais artificiais, análise de componentes principais, lógica *fuzzy* (difusa, nebulosa), filtro de Kalmam, máquina de vetores de suporte (*Support Vector Machine*, SVM), algoritmo genético (*Genetic Algorithm*, GA), sistemas especialistas, controle estatístico de processos (*Statistical Process Control*, SPC), análise discriminante de Fisher, regressão por mínimos quadrados parciais e grafos direcionados com sinais. Dentre as técnicas citadas, destacam-se as sete primeiras, pois estas respondem por quase 90% dos artigos desse grupo, o que mostra a

grande participação das técnicas classificadas como inteligência artificial entre os trabalhos mais recentes.

Algumas particularidades podem ser observadas no uso das técnicas citadas acima. Redes neuronais artificiais, por exemplo, são conhecidas por serem tolerante a ruídos, pois são adaptativas e capazes de aprender e generalizar (Ozyurt & Kandel, 1996). Então, devido a sua capacidade de modelar sistemas complexos, reconhecer padrões e classificar informações, são largamente utilizadas em diversos sistemas e têm se mostrado capazes de obter bons resultados quando aliadas a outras técnicas. Da mesma forma, a lógica *fuzzy*, que foi desenvolvida para tratar imprecisões, ambigüidades e incertezas nas informações (Meza *et alli*, 2006), tem tido aplicação nos mais diversos sistemas, muitas vezes em conjunto com outra técnica. Tanto em um caso quanto no outro, sistemas neuro-*fuzzy* foram os mais utilizados, quando técnicas híbridas foram aplicadas (Ayoubi e Isermann, 1997a). A análise de componentes principais (PCA) envolve um procedimento matemático que transforma um número de possíveis variáveis correlacionadas em um número menor de variáveis não correlacionadas, chamadas de componentes principais. Em sistemas complexos e com muitas variáveis envolvidas, como os sistemas típicos da indústria de processos, a PCA é bastante utilizada, em alguns casos como método de referência para comparação com outras técnicas (Lee *et alli*, 2006). Já o algoritmo de aprendizagem SVM consiste em uma técnica computacional de aprendizado supervisionado para problemas de reconhecimento de padrões. Este algoritmo tem como objetivo a determinação de limites de decisão que produzam uma separação ótima entre classes, por meio da minimização dos erros (Vapnik, 1995). Em muitos casos é utilizado em combinação com outras técnicas e tem bastante aplicação em problemas de detecção de falhas em motores, equipamentos rotativos e rolamentos, bem como em sistemas de transmissão de energia elétrica. O algoritmo genético, por ser um algoritmo de otimização e busca, tem sido utilizado principalmente aliado a outras técnicas, em geral como estimador de parâmetros, como em Fei e Zhang (2009). Redes neuronais, lógica *fuzzy* e SVM são as técnicas com as quais o GA é mais utilizado em conjunto. Dentre os artigos pesquisados, os trabalhos mais citados para cada uma das técnicas mais utilizadas são aqueles mostrados no Quadro II.5.

Quadro II.5. Trabalhos mais citados nas diferentes técnicas utilizadas para FDIAC

Redes Neurais	<i>Fault detection for modern diesel engines using signal- and process model-based methods (Kimmich et al., 2005).</i>
	<i>Fault diagnosis in multivariate control charts using artificial neural networks (Niaki e Abbasi, 2005).</i>
	<i>Gear fault detection using artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithms (Samanta, 2004).</i>
PCA	<i>Fault identification for process monitoring using kernel principal component analysis (Cho et al., 2005).</i>
	<i>Fault detection and identification of nonlinear processes based on kernel PCA (Choi et al., 2005).</i> <i>Fault detection of batch processes using multiway kernel principal component analysis (Lee et al., 2004).</i>
Lógica Fuzzy	<i>A neuro-fuzzy approach to automatic diagnosis and location of stator inter-turn faults in CSI-fed PM brushless DC motors (Awadallah et al., 2005).</i>
	<i>Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference (Lou e Loparo, 2004).</i>
Filtro de Kalman	<i>From data to diagnosis and control using generalized orthonormal basis filters. Part II: Model predictive and fault tolerant control (Patwardhan e Shah, 2006).</i>
SVM	<i>Fault diagnosis based on Fisher discriminant analysis and support vector machines (Chiang et al., 2004).</i>
	<i>Gear fault detection using artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithms (Samanta, 2004).</i>
	<i>Combination of independent component analysis and support vector machines for intelligent faults diagnosis of induction motors (Widodo et al., 2007).</i>
Algoritmo Genético	<i>Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs (Lei et al., 2007).</i>
	<i>Gear fault detection using artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithms (Samanta, 2004).</i>
	<i>Fault detection using genetic programming (Zhang et al., 2005).</i>
Sistemas Especialistas	<i>VIBEX: an expert system for vibration fault diagnosis of rotating machinery using decision tree and decision table (Yang et al., 2005).</i>

As áreas onde esses artigos se concentram são basicamente cinco, de acordo com a classificação da *Web of Science*: engenharia elétrica e eletrônica; automação e

sistemas de controle; engenharia química; inteligência artificial e engenharia mecânica, o que está de acordo com os sistemas de aplicação mais utilizados. A maioria dos trabalhos é aplicada em sistemas ligados a geração, transformação e distribuição de energia elétrica (8%), equipamentos da indústria de processos (reatores, colunas, sensores e atuadores) (77%), e motores e rolamentos (11%).

No Quadro II.6 são apresentadas as técnicas mais utilizadas nos sistemas de FDIAC aplicados nesses processos e, em cada caso, uma referência é apresentada a título de exemplo.

Quadro II.6. Técnicas mais utilizadas nos sistemas de FDIAC aplicados a sistemas elétricos, indústrias de processo, sensores e equipamentos rotativos e rolamentos

Sistemas de geração, transformação e distribuição de energia	Redes neuronais (Hung e Wang, 2004) <i>Fuzzy</i> (Naresh <i>et al.</i> , 2008) SVM (Ganyun <i>et al.</i> , 2005) Sistemas especialistas (Cardoso <i>et al.</i> , 2008)
Indústrias de processo	Redes neuronais (Behbahani <i>et al.</i> , 2009) <i>Fuzzy</i> (Rajakarunakaran, 2006) Kalmam (Chetouani, 2008) PCA (Sharmin <i>et al.</i> , 2008)
Equipamentos rotativos e rolamentos	Redes neuronais (Taplak <i>et al.</i> , 2006) SVM (Sugumaran <i>et al.</i> , 2008)

II.7. CONCLUSÃO

Após o confronto e a análise crítica das diversas terminologias utilizadas em trabalhos de detecção, diagnóstico e correção de falhas, o presente trabalho chegou a um conjunto consistente de termos e definições que parecem ser os mais apropriados para serem utilizados, inclusive em língua portuguesa (Quadro II.1 a Quadro II.3). O sistema, e sua respectiva área de pesquisa, foi denominado de gerenciamento de eventos anormais (AEM). A sigla FDIAC também foi usada para representar o conjunto mais amplo das tarefas desta área, que é composto por detecção (D), diagnóstico (isolamento e análise, IA) e correção (C) de falhas (F).

Fault (pane), que é o estado de falha, e *failure* (evento de falha) e *malfunction* (mau funcionamento), eventos anteriores ao estado de falha (*failure* no caso da perda total da capacidade funcional, ou *malfunction* no caso de perda parcial), são os principais objetos de estudo da área de AEM, e foi mostrada de forma clara a correlação existente entre estes objetos (

Figura II.1). Nos sistemas de AEM, de forma geral, primeiramente a falha é detectada para depois serem realizadas as tarefas de diagnóstico (isolamento e análise) e correção da falha. O diagnóstico de falhas fornece então assistência para a tomada de ações de correção. A correlação entre estas atividades e suas variáveis de entrada e de saída também foram estabelecidas de forma clara (Figura II.2). Além disso, os diversos tipos de falhas foram definidos, tendo sido mostrados os diferentes critérios sob os quais eles são classificados. A análise da literatura recente mostra ainda que os sistemas que têm tido mais aplicação de sistemas de FDIAC na literatura são aqueles ligados à geração e distribuição de energia, a equipamentos da indústria de processos (reatores, colunas, sensores e atuadores) e a motores e rolamentos, utilizando principalmente técnicas de redes neurais, análise de componentes principais (PCA), lógica *fuzzy*, filtro de Kalman, SVM, algoritmo genético e sistemas especialistas.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AEM	: <i>Abnormal Event Management</i> (gerenciamento de eventos anormais);
DDF	: Detecção e Diagnóstico e de Falhas (<i>fault detection and diagnosis</i>);
DIF	: Detecção e Isolamento (ou isolação) de Falhas (<i>fault detection isolation</i>);
EKF	: <i>Extended Kalman Filter</i> (filtro de Kalman estendido);
ES	: <i>Expert System</i> (sistemas especialistas);
FDD	: <i>Fault Detection and Diagnosis</i> (detecção e diagnóstico e de falhas);
FDI	: <i>Fault Detection Isolation</i> (detecção e isolamento (ou isolação) de falhas);
FDIA	: <i>Fault Detection Isolation and Analysis (diagnosis)</i> (detecção, isolamento (ou isolação) e análise (diagnóstico) de falhas);
FDIAC	: <i>Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction</i> (detecção, diagnóstico (isolamento e análise) e correção de falhas);
GA	: <i>Genetic Algorithm</i> (algoritmo genético);
IEC	: <i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Internacional de Eletrotécnica);
IFAC	: <i>International Federation of Automatic Control</i> (Federação Internacional de Controle Automático);

ISO	: <i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Padronização);
NN	: <i>Neural Network</i> (rede neuronal);
PCA	: <i>Principal Component Analysis</i> (análise de componentes principais);
PLS	: <i>Partial Least Squares</i> (mínimos quadrados parciais);
QPT	: <i>Qualitative Process Theory</i> (teoria qualitativa de processo);
QSIM	: <i>Qualitative SIMulation</i> (simulação qualitativa);
QTA	: <i>Qualitative Trend Analysis</i> (análise qualitativa de tendências);
RAM	: <i>Reliability, Availability and Maintainability</i> (confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade);
SAFEPROCESS	: <i>Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes</i> (Simpósio em Detecção de Falhas, Supervisão e Segurança de Processos Técnicos);
SDG	: <i>Signed Directed Graph</i> (grafos direcionados por sinais);
SPC	: <i>Statistical Process Control</i> (controle estatístico de processos);
SVM	: <i>Support Vector Machine</i> (máquina de vetores de suporte).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1994). Confiabilidade e manutenibilidade. NBR 5462, *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Awadallah, M. A. M. M. Morcos, S. Gopalakrishnan & T. W. Nehl (2005). A neuro-fuzzy approach to automatic diagnosis and location of stator inter-turn faults in CSI-fed PM brushless DC motors. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 20, pp 253-259;
- Ayoubi, M. & R. Isermann, (1997). Neuro-fuzzy systems for diagnosis. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 89, n° 3, pp 289-307;
- Behbahani, R. M., H. Jazayeri-rad & S. Hajmirzaee (2009). Fault detection and diagnosis in a sour gas absorption column using neural networks. *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 32, pp 840-845;
- Blázquez, L. F. & L. J. de Miguel (2005). Additive fault detection in nonlinear dynamic systems with saturation. *ISA Transactions*, Vol. 44, pp 515-538;

- Cardoso, G., J. G. Rolim & H. H. Zurn (2008). Identifying the primary fault section after contingencies in bulk power systems. *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 23, pp 1335-1342;
- Chetouani, Y. (2008). Design of a multi-model observer-based estimator for fault detection and isolation (FDI) strategy: application to a chemical reactor. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 25, pp 777-788;
- Chiang, L. H., E. L. Russel & R. D. Braatz (2001). Fault detection and diagnosis in industrial systems. 1. ed., *Springer*, London, UK;
- Chiang, L. H., M. E. Kotanchek & A. K. Kordon (2004). Fault diagnosis based on Fisher discriminant analysis and support vector machines. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 28, pp 1389-1401;
- Cho, J. H., Lee J. M., Choi S. W., D. Lee & I. B. Lee (2005). Fault identification for process monitoring using kernel principal component analysis. *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp 279-288;
- Choi, S. W., C. Lee, J. M. Lee, J. H. Park & I. B. Lee (2005). Fault detection and identification of nonlinear processes based on kernel PCA. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 75, pp 55-67;
- Fei, S. W. & X. B. Zhang (2009) Fault diagnosis of power transformer based on support vector machine with genetic algorithm. *Expert Systems With Applications*, Vol. 36, pp 11352-11357;
- Fernandes, R. G. (2007). Detecção e isolamento de falhas em sistemas dinâmicos baseados em redes neurais. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, Brasil;
- Frank, P. M. (1990). Fault diagnosis in dynamic-systems using analytical and knowledge-based redundancy. *Automatica*, Vol. 26, pp 459-474;
- Frank, P. M. & B. Koppen-Seliger (1997a) Fuzzy logic and neural network applications to fault diagnosis. *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 16, pp 67-88;
- Frank, P. M. & B. Koppen-Seliger (1997b). New developments using AI in fault diagnosis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 10, pp 3-14;
- Frank, P. M., E. A. Garcia & B. Koppen-Seliger (2000). Modelling for fault detection and isolation versus modelling for control. *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 53, pp 259-271;

- Ganyun, L. V., H. Z. Cheng, H. B. Zhai & L. X Dong (2005). Fault diagnosis of power transformer based on multi-layer SVM classifier. *Electric Power Systems Research*, Vol. 74, pp 1-7;
- Gertler, J. J. (1988). Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 8, pp 3-11;
- Himmelblau, D. M. (1978). Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes. *Elsevier*, Amsterdam, Netherlands;
- Hung, C. P. & M. H. Wang (2004). Diagnosis of incipient faults in power transformers using CMAC neural network approach. *Electric Power Systems Research*, Vol. 71, pp 235-244;
- IEC (1990). International electrotechnical vocabulary – Chapter 191: Dependability and quality of service. IEC 50 (191), *International Electrotechnical Commission (IEC)*, Geneva, Switzerland;
- Isermann, R. (1984). Process fault detection based on modeling and estimation methods. *Automatica*, Vol. 20, pp 387-404;
- Isermann, R. (1997a). Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods. *Control Engineering Practice*, Vol. 5, pp 639-652;
- Isermann, R. & P. Ballé (1997b). Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control Engineering Practice*, Vol. 5, pp 709-719;
- Isermann, R. (2006). Fault-diagnosis systems, an introduction from fault detection to fault tolerance. *Springer*, Berlin, Germany;
- ISO & IEC (1993). Information technology – Vocabulary – Part 1: Fundamental terms. ISO/IEC 2382-1, *International Organization for Standardization (ISO) Standard*, Genève, Switzerland;
- Kimmich, F., A. Schwarte & R. Isermann (2005). Fault detection for modern diesel engines using signal- and process model-based methods. *Control Engineering Practice*, Vol. 13, pp 189-203;
- Lee, J. M., C. Yoo & I. B. Lee (2004). Fault detection of batch processes using multiway kernel principal component analysis. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 28, pp 1837-1847;

- Lee, C., S. W. Choi & I. B. Lee (2006). Variable reconstruction and sensor fault identification using canonical variate analysis. *Journal of Process Control*, Vol. 16, pp 747-761;
- Lei, Y. Z. He, Y. Zi & Q. Hu (2007). Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs. *Mechanical Systems And Signal Processing*, Vol. 21, pp 2280-2294;
- Leonhardt, S., M. Ayoubi (1997). Methods of fault diagnosis. *Control Eng. Practice*, Vol. 5, pp 683-692;
- Liao, S (2005). Expert system methodologies and applications. *Expert Systems with Applications*, Vol. 28, n° 1, pp 93-103;
- Lou, X. S. & K. A. Loparo (2004). Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference. *Mechanical Systems And Signal Processing*, Vol. 18, pp 1077-1095;
- Meza, E. B. M., J. C. Stacchini de Souza, M. Th. Schilling & M. B. do Coutto Filho (2006). Utilização de um modelo neuro-fuzzy para a localização de defeitos em sistemas de potência. *Controle & Automação*, Vol. 17, n° 1, pp 103-114;
- Nandi, S., H. A. Toliyat & X. D. Li (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 20, pp 719-729;
- Naresh, R., V. Sharma & M. Vashisth (2008). An integrated neural fuzzy approach for fault diagnosis of transformers. *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 23, pp 2017-2024;
- Niaki, S. T. & B. Abbasi (2005). Fault diagnosis in multivariate control charts using artificial neural networks. *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 21, pp 825-840;
- Nimmo, I. (1995). Adequately address abnormal situation operations. *Chemical Engineering Progress*, Vol. 91, pp 36-45;
- Ozyurt, B & A. Kandel, (1996). A hybrid hierarchical neural network-fuzzy expert system approach to chemical process fault diagnosis. *Fuzzy sets and systems*. Vol. 83, n° 1, pp 11-25;
- Palma, L. B., R. N. Silva & F. V. Coito (2002). Metodologia híbrida de detecção e diagnóstico de falhas em tempo-real. *Conferência Científica e Tecnológica em Engenharia*, Lisboa, pp 1-7;

- Patton, R. J. (1993). Robustness issues in fault-tolerant control. *Proceedings of IEE Colloquium on Fault Diagnosis and Control System Reconfiguration*, London, England, pp 1-125;
- Patwardhan, S. C. & S. L. Shah (2006). From data to diagnosis and control using generalized orthonormal basis filters. *Journal of Process Control*, Vol. 16, pp 157-175;
- Raich, A. & A. Çinar (1996). Statistical process monitoring and disturbance diagnosis in multivariable continuous processes. *Aiche Journal*, Vol. 42, pp 995-1009;
- Rajakarunakaran, S., D. Devaraj, R. G. S. Venkat & P. R. K. Surya (2006). Fuzzy system approach for fault diagnosis in LPG bottling plant: A case study. *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications And Practice*, Vol. 13, pp 292-298;
- Rivera, M. H. M. (2007). Diagnóstico de Falhas em Sistemas a Eventos Discretos : Uma Proposta de Aplicação em Processos de Separação Óleo-Gás. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Rueda, E.; S. A. Tassou & I. N. Grace (2005). Fault detection and diagnosis in liquid chillers. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part E-Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 219, pp 117-125;
- Samanta, B. (2004). Gear fault detection using artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithms. *Mechanical Systems And Signal Processing*, Vol. 18, pp 625-644;
- Sharmin, R., S. L. Shah & U. Sundararaj (2008). A PCA based fault detection scheme for an industrial high pressure polyethylene reactor. *Macromolecular Reaction Engineering*, Vol. 2, pp 12-30;
- Sugumaran, V., G. R. Sabareesh & K. I. Ramachandran (2008). Fault diagnostics of roller bearing using kernel based neighborhood score multi-class support vector machine. *Expert Systems With Applications*, Vol. 34, pp 3090-3098;
- Taplak, H., I. Uzmay & S. Yildirim (2006). An artificial neural network application to fault detection of a rotor bearing system. *Industrial Lubrication And Tribology*, Vol. 58, pp 32-44;
- Teixeira, A. C. (2000). Detecção e diagnóstico de falhas em sistemas de processos químicos. Importância do conhecimento de estados intermediários de processos

- dinâmicos. Desenvolvimento de uma metodologia baseada em redes neurais. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Tinós, R. (1999). Detecção e diagnóstico de falhas em robôs manipuladores via redes neurais artificiais. Dissertação de Mestrado, USP, São Carlos, SP, Brasil;
- Uraikul, V., V. Raikul, C. W. Chan & P. Tontiwachwuthikul (2007). Artificial intelligence for monitoring and supervisory control of process systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 20, pp 115-131;
- Vapnik, V. (1995). The nature of statistical learning theory. *Springer-Verlag*, New York, USA;
- Venkatasubramanian, V., R. Rengaswamy, K. Yinc & S. N. Kavuri (2003a). A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp 293-311;
- Venkatasubramanian, V., R. Rengaswamy & S. N. Kavuri (2003b). A review of process fault detection and diagnosis Part II: Qualitative models and search strategies. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp 313-326;
- Venkatasubramanian, V., R. Rengaswamy, S. N. Kavuri & K. W. Yin (2003c). A review of process fault detection and diagnosis Part III: Process history based methods. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp 327-326;
- Widodo, A., B. S. Yang & T. Han (2007). Combination of independent component analysis and support vector machines for intelligent faults diagnosis of induction motors. *Expert Systems With Applications*, Vol. 32, pp 299-312;
- Willsky, A. S. (1976). Survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatica*, Vol. 12, pp 601-611;
- Yang, B. S., D. S. Lim & A. C. Tan (2005). VIBEX: an expert system for vibration fault diagnosis of rotating machinery using decision tree and decision table. *Expert Systems With Applications*, Vol. 28, pp 735-742;
- Zhang, L., L. B. Jack & A. K. Nandi (2005). Fault detection using genetic programming. *Mechanical Systems And Signal Processing*, Vol. 19, pp 271-289;
- Zogg, D., E. Shafai & H. P. Geering (2006). Fault diagnosis for heat pumps with parameter identification and clustering. *Control Engineering Practice*, Vol. 14, pp 1435-1444.

CHAPTER III

Chapter III. Fault detection, diagnosis and correction in industrial processes: An overview of research in Brazil and around the world

ABSTRACT

This paper presents a survey of research into fault detection, diagnosis and correction in Brazil and around the world. A historical overview of the research field and a survey of the international scientific production in terms of articles published in journals is presented and analyzed. In the case of national scientific production, a similar but broader and deeper analysis is carried out covering the production of international articles, the production of national articles as well as all the theses and dissertations already published in this subject area. Applications of fault detection, diagnosis and correction in industrial problems were also classified. This work shows that studies in this area are a relevant topic for process engineering as a whole. Apart from the United States, many Asian countries were seen to be active in the development of research in the area. On the national scenario however, the quantity of papers published in journals remains limited, especially on the international scale which shows that the scientific contribution of Brazil is still incipient in the area of FDIAC - Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction. Among the applications, a fairly balanced distribution from among mechanical systems and manufacturing industries, chemical systems and process industries, and electrical systems and power generation industries was identified.

KEYWORDS

fault detection, diagnosis and correction; industrial processes; world survey; Brazilian survey

CAPÍTULO III

Capítulo III. Detecção, diagnóstico e correção de falhas em processos industriais: Um panorama das pesquisas no Brasil e no mundo

RESUMO

Neste capítulo é feito um levantamento e é apresentado um panorama sobre a pesquisa na área de detecção, diagnóstico e correção de falhas, no Brasil e no mundo. Dessa forma, é apresentado um histórico da área de pesquisa e é analisada a produção científica internacional em termos de artigos publicados em periódicos indexados. No caso da produção científica nacional, é feita uma análise semelhante, porém mais ampla e profunda, abrangendo, além da produção de artigos indexados internacionalmente, a produção de artigos indexados nacionalmente e todas as teses e dissertações já publicadas na área neste tema. Aplicações de detecção, diagnóstico e correção de falhas em problemas industriais também foram classificadas. Este trabalho mostra que os estudos nesta área são um tema de relevância para a engenharia de processos como um todo, sendo observada também, além dos Estados Unidos, uma boa participação dos países asiáticos no desenvolvimento das pesquisas da área. No cenário nacional, observa-se que a quantidade de trabalhos publicados em periódicos ainda é tímida, principalmente em escala internacional, o que mostra que a contribuição científica brasileira ainda é incipiente na área de FDIAC - *Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction*; detecção, diagnóstico (isolamento e análise) e correção de falhas. Entre as aplicações, observa-se uma distribuição bastante equilibrada entre sistemas mecânicos e indústrias de manufatura, sistemas químicos e indústrias de processos, e sistemas elétricos e indústrias de geração de energia.

PALAVRAS-CHAVE

detecção, diagnóstico e correção de falhas; processos industriais; panorama mundial; panorama brasileiro

III.1. INTRODUÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA DE PESQUISA

Este estudo consiste de um levantamento e uma análise sobre a área de pesquisa em detecção e diagnóstico de falhas em processos industriais no Brasil e no mundo, sendo o seu objetivo fornecer um panorama atual, nacional e internacional, das pesquisas científicas nesta área, enfatizando as diferentes aplicações industriais. A análise desta área é obtida através da apresentação de um panorama histórico das suas pesquisas, desde a origem até os tempos atuais. Assim, na sequência desta seção é apresentado o histórico da área de pesquisa, e na seção III.2 é apresentado o escopo da pesquisa realizada, mostrando a sua delimitação e metodologia. Nas seções III.3 (mundo) e III.4 (Brasil) é apresentado o panorama atual da área de pesquisa, enfocando a distribuição da produção científica por áreas do conhecimento, periódicos, países, instituições e autores. Na seção III.5 são apresentadas as conclusões e comentários finais do trabalho.

Durante muito tempo o termo “diagnóstico” foi invariavelmente relacionado à medicina, caracterizando o campo que trata do reconhecimento de doenças através de sintomas. O diagnóstico aplicado a sistemas tecnológicos, como uma área do conhecimento, começou a se desenvolver há cerca de 50 anos atrás. No início, os objetos de interesse de diagnóstico eram somente maquinaria e dispositivos mecânicos. Em seguida, foram acrescentados outros objetos de interesse como dispositivos elétricos, sistemas eletrônicos, dispositivos tecnológicos complexos e mais recentemente manufatura e indústrias de processos, bem como sistemas de controle.

O desenvolvimento da área de diagnóstico aplicado a sistemas tecnológicos começou de forma mais consistente na década de 70, em vários lugares, com trabalhos como os de Beard (1971) e Jones (1973), que relataram a detecção de falhas em sistemas lineares baseada em observadores. Um resumo deste desenvolvimento é dado por Willsky (1976). A primeira publicação sobre a detecção e o diagnóstico de falha em problemas relacionados à indústria de processos foi o trabalho de Himmelblau (1978), que tratou de métodos baseados em modelo (Chiang *et al.*, 2001). Desde então diversas aplicações foram relatadas nessa área como, por exemplo, em reatores químicos, bioquímicos e de polimerização, em processos de refino de petróleo, além de processos das indústrias de aço e papel.

Durante as últimas décadas, a pesquisa em detecção e diagnóstico de falhas ganhou interesse crescente no mundo inteiro. Este desenvolvimento foi, e continua

sendo, estimulado principalmente pela tendência de automatização de processos e pelo crescimento da demanda por disponibilidade mais elevada e pela segurança dos sistemas de controle. Um estímulo igualmente forte vem do lado da teoria de controle moderna, que trouxe técnicas poderosas de modelagem matemática, avaliação de estados e identificação de parâmetros, que se tornaram possíveis graças ao espetacular progresso da informática moderna (Frank, 1990).

Tarefas de detecção e diagnóstico já eram realizadas desde que os processos começaram a operar. Esta tarefa era feita tradicionalmente pelo homem. Portanto, o que há de novo é a crescente automação destas tarefas, e a utilização de técnicas cada vez mais sofisticadas (Venkatasubramanian *et al.*, 2003). Hoje em dia a teoria de FDIAC está transformando-se em um campo importante da teoria de controle automático. Nos primeiros vinte anos, foi a comunidade de controle que fez contribuições decisivas, enquanto nos últimos anos, a evolução tem sido marcada por um número crescente de contribuições da ciência da computação e da inteligência artificial (Palma, 2006).

Tradicionalmente as tarefas de detecção e diagnóstico estiveram ligadas à área de manutenção, e por esse motivo muitas vezes ainda é tratada dessa forma. No Brasil, a norma de RAM (ABNT, 1994) atribui essas tarefas à manutenção. Contudo, a tendência atual é a incorporação dessas tarefas pelo setor de automação, pois a automatização das tarefas de detecção e diagnóstico tem gerado sistemas de supervisão com diagnóstico de falhas, como os sistemas de controle tolerantes a falhas.

Segundo Venkatasubramanian *et al.* (2003), a indústria de processos considera a automatização dos sistemas de detecção e diagnóstico de falhas como o próximo marco da pesquisa e da aplicação de sistemas de controle, assim como foi a automatização do controle regulatório no passado. O interesse crescente no campo foi levado em consideração e, assim, foi criado em 1991, dentro da IFAC, um comitê de direção do SAFEPROCESS que se transformou então em um comitê técnico em 1993 (Isermann e Ballé, 1997). Um simpósio SAFEPROCESS foi organizado em Baden-Baden (Alemanha), em 1991, e uma segunda vez em Espoo (Finlândia), em 1994. Os simpósios seguintes ocorreram em Hull (Inglaterra), em 1997, Budapeste (Hungria), em 2000, Washington D.C. (Estados Unidos), em 2003, Pequim (China), em 2006 e, recentemente, em Barcelona (Espanha), em 2009.

III.2. DELIMITAÇÃO E METODOLOGIA DA PESQUISA REALIZADA

A produção científica na área é capaz de revelar a evolução, bem como a situação atual das pesquisas em FDIAC no Brasil e no mundo. Portanto, foi realizada uma ampla investigação dos trabalhos realizados na área, com foco nas aplicações industriais, em periódicos nacionais e internacionais, teses e dissertações nacionais, além de congressos e simpósios relevantes.

Foram considerados como trabalhos com aplicação em problemas industriais aqueles que contêm: os sistemas elétricos e indústrias de geração, transmissão e distribuição de energia; os sistemas químicos e indústrias de processos químicos, bioquímicos, farmacêuticos e nucleares; os sistemas mecânicos e indústrias de manufatura; captação, tratamento e distribuição de água; indústria de construção naval e aeroespacial; indústria têxtil, indústria metalúrgica e as demais indústrias de processamento. Não foram considerados, por exemplo, trabalhos aplicados a sistemas de telecomunicação, sistemas de condicionamento térmico, sistemas de automação predial e sistemas computacionais e de rede. Também não foram considerados trabalhos aplicados à análise de falhas estruturais (relacionadas a ensaios de materiais ou à construção civil) e falhas em equipamentos ou sistemas não industriais.

No caso de publicações em periódicos, tentou-se quantificar e detalhar a produção científica a nível nacional e internacional através das publicações em periódicos indexados na base de dados *Web of Science* (WS, 2010) e *SciELO (Scientific Electronic Library Online)* (SciELO, 2010). Já para definir o panorama nacional, também foi realizada uma pesquisa na base de dados do sítio do banco de teses da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) (CAPES, 2010), a fim de perceber de forma mais detalhada o perfil da pesquisa nacional na área. Simpósios e congressos não foram pesquisados a fundo, devido à pequena disponibilidade de dados sobre as publicações, ao grande número de eventos passíveis de publicação e ao fato de muitos dos trabalhos serem em seguida publicados em periódicos. Contudo, como os simpósios e congressos promovidos pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e pela IFAC estão entre os de maior destaque na área, julgou-se necessário destacar algumas informações.

No SAFEPROCESS da IFAC (IFAC, 2009) podem ser encontrados trabalhos referentes a estudos de casos industriais, de processo ou que apresentem alguma relação com a engenharia de processo. As publicações variam de artigos teóricos a estudos de

casos, nas diversas áreas da aplicação deste tema. Pode-se citar, como exemplos, desde a aplicação em equipamentos de processo, como análise de falhas em sensores de vibração (Halim *et al.*, 2006), até o desenvolvimento de sistemas *on-line* de detecção e isolamento da falha (Mok *et al.*, 2006). O IEEE (IEEE, 2009), diferentemente da IFAC, não promove nenhum evento específico voltado para o tema. Porém, como ele atua em áreas como sistemas aeroespaciais, computadores e telecomunicações, engenharia biomédica, elétrica, sistemas de potência e eletrônicos, dentre outras, podem ser encontrados diversos trabalhos que tratam do tema, envolvendo inclusive casos industriais.

Nas próximas duas seções são apresentados os resultados encontrados nos âmbitos nacional e internacional.

III.3. PRODUÇÃO CIENTÍFICA INTERNACIONAL

Para dimensionar o número de publicações em periódicos internacionais, foi realizada uma busca na base de dados *Web of Science* (WS, 2010), na qual foram encontrados 1141 artigos publicados no período compreendido entre 2004 e 2009. Com base na busca realizada foi possível extrair informações relativas ao nome dos autores, aos países de origem de cada publicação, à quantidade de publicações realizadas a cada ano, às instituições de ensino envolvidas na confecção dos artigos, e à quantidade de artigos por periódico. Foi observado, por exemplo, que as 1141 publicações encontradas distribuem-se entre 154 diferentes periódicos, 477 autores diferentes, e 271 instituições de ensino e pesquisa espalhadas pelo mundo. Os dados referem-se unicamente a publicações de artigos e *reviews* em periódicos indexados nesta base de dados.

Como observado anteriormente, as publicações na área de FDIAC começaram a surgir na década de 70, tendo uma expansão significativa se configurado na década de 90. A distribuição das publicações ao longo dos anos é apresentada na Figura III.1, onde é possível perceber essa expansão. No começo do século 21 houve um elevado crescimento, chegando ao valor máximo em 2009, com 120 publicações entre artigos e *reviews* (artigos de revisão). Isso pode ser explicado pelo desenvolvimento de novas ferramentas computacionais, entre elas a inteligência artificial, que contribuiu significativamente para a ampliação dos estudos na área. A média de publicações ao longo do período de 1975-2009 foi de aproximadamente 34 artigos por ano.

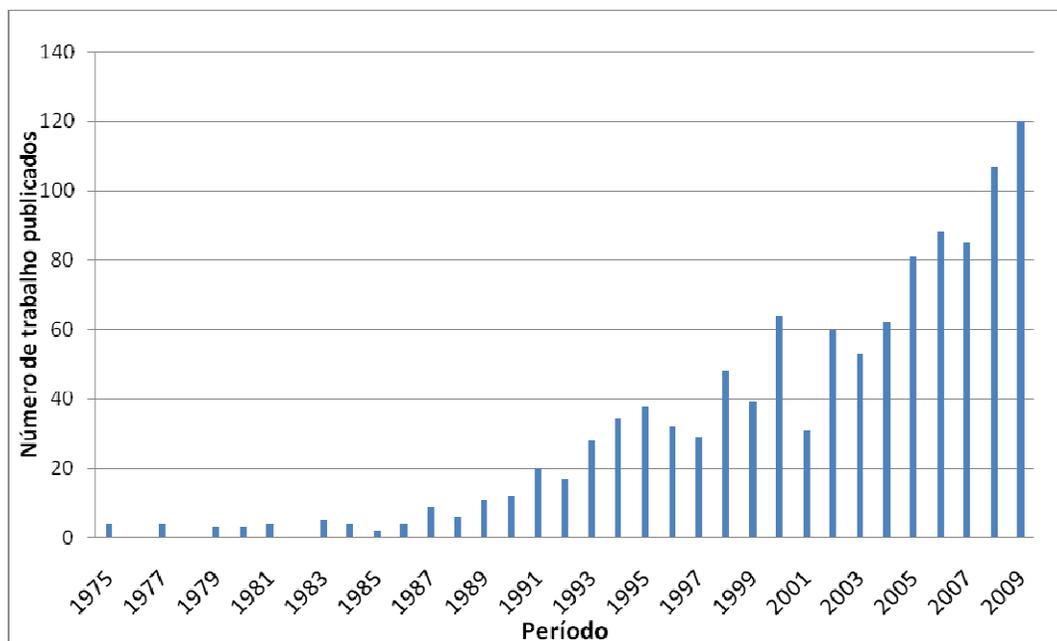


Figura III.1. Distribuição temporal da produção científica internacional na área de FDIAC.

A distribuição das publicações entre os periódicos encontra-se dividida em 48 áreas, sendo que as áreas de engenharia elétrica e eletrônica, automação e controle, engenharia química, inteligência artificial para ciência da computação e engenharia mecânica são aquelas que mais possuem publicações relacionadas, como mostra a Tabela III.1. A área da engenharia química encontra-se na 3^a posição, contando com 239 publicações, mostrando que os estudos na área de FDIAC são um tema de relevância para a engenharia de processamento como um todo.

Tabela III.1. Distribuição da produção científica internacional na área de FDIAC entre as áreas de conhecimento

Nome	Quantidade de artigos publicados	Porcentagem total de artigos publicados
<i>Engineering, Electrical & Electronic</i>	399	34,9
<i>Automation & Control Systems</i>	295	25,8
<i>Engineering, Chemical</i>	239	21,0
<i>Computer Science, Artificial Intelligence</i>	141	12,4
<i>Engineering, Mechanical</i>	141	12,4

Quanto aos periódicos que publicaram artigos na área de detecção e diagnóstico de falhas, destacam-se os seguintes: *Industrial & Engineering Chemistry Research*,

Control Engineering Practice, AIChE Journal, Computers & Chemical Engineering, Mechanical Systems and Signal Processing, como pode ser observado na Tabela III.2. Dentre os periódicos nacionais, encontrou-se apenas o *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, correspondendo a aproximadamente 0,2% do total de publicações, na 98ª posição. Confrontando a Tabela III.1 com a Tabela III.2 é possível observar uma aparente contradição em relação à área que mais apresentou publicações em FDIAC (*Engineering, Electrical & Electronic*) e o periódico que mais publicou (*Industrial & Engineering Chemistry Research*). Isto se deve ao fato de que a *Wef of Science*, ao cadastrar as publicações em seu sítio, classifica as mesmas de acordo com a linha editorial do periódico, que em geral abrange mais de uma área.

Tabela III.2. Distribuição da produção científica internacional na área de FDIAC entre os principais periódicos da área

Posição	Nome	Quantidade de artigos publicados	Porcentagem do total de artigos publicados
1º	<i>Industrial & Engineering Chemistry Research</i>	48	4,5
2º	<i>Control Engineering Practice</i>	47	4,4
3º	<i>AIChE Journal</i>	36	3,3
4º	<i>Computers & Chemical Engineering</i>	35	3,3
5º	<i>Mechanical Systems and Signal Processing</i>	31	2,8
...
98º	<i>Brazilian Journal of Chemical Engineering</i>	2	0,2
	Total	199	15,2
	Demais	942	84,8

No que se refere ao país de origem, o número total de países envolvidos na produção científica do segmento de detecção e diagnóstico de falhas corresponde a um total de 50 países. Dentre os principais encontram-se: Estados Unidos da América (EUA), China, Inglaterra, Coreia do Sul e Taiwan, conforme mostra a Tabela III.3. O Brasil encontra-se, até o momento, na vigésima sétima posição, o que mostra como esta área ainda é incipiente no país.

Tabela III.3. Distribuição da produção científica internacional na área de FDIAC entre os países

Posição	Nome	Quantidade de artigos publicados	Porcentagem total de artigos publicados
1º	Estados Unidos	315	27,6
2º	China	134	11,7
3º	Inglaterra	105	9,2
4º	Coréia do Sul	72	6,3
5º	Taiwan	66	5,8
...
27º	Brasil	23	2,0
	Total	715	62,6
	Demais	426	37,4

Entre as instituições de ensino e pesquisa que mais se destacaram em número de publicações na área estão *University of Texas* (EUA), *Purdue University* (EUA), *University of Michigan* (EUA), *Univerty of Alberta* (Canadá) e *Korea Advanced Institute of Science and Technology* (Coréia do Sul) (Tabela III.4). Ao todo, foram encontradas 271 instituições que apresentaram trabalhos na área de detecção e diagnóstico de falhas. Nesta busca foram encontradas instituições brasileiras, tais como a Universidade Federal do Rio de Janeiro, com duas publicações, e a Universidade Federal de Santa Catarina, também com duas publicações, o que corresponde a 0,2% do total de artigos publicados para cada instituição.

Tabela III.4. Distribuição da produção científica internacional na área de FDIAC entre as instituições de ensino e pesquisa

Nome da instituição	Quantidade de artigos publicados	Porcentagem total de artigos publicados
<i>University of Texas</i>	25	2,4
<i>Purdue University</i>	25	2,2
<i>University of Michigan</i>	20	1,7
<i>Univerty of Alberta</i>	29	1,6
<i>Indian Institute of Technology</i>	17	1,5
Total	116	9,2
Demais	1025	90,8

Por fim, é importante destacar os autores que mais publicaram na área. São eles: S. J. Qin, H. Matsuyama, R. Rengaswamy, V. Venkatasubramanian, C. T. Chang, R. Isermann, I. B. Lee, E. S. Yoon, D. M. Himmelblau e D. H. Zhou. Suas publicações

correspondem a aproximadamente 11% do total de publicações, como pode ser observado na Tabela III.5.

Tabela III.5. Distribuição da produção científica internacional na área de FDIAC entre autores

Nome	Quantidade de artigos publicados	Porcentagem total de artigos publicados	Instituição ^(*)
Qin, S. J.	20	1,8	<i>University of Southern California, EUA</i>
Matsuyama, H.	14	1,3	<i>Kyushu University, Japão</i>
Rengaswamy, R.	13	1,2	<i>Clarkson University, EUA</i>
Venkatasubramanian, V.	13	1,2	<i>Purdue University, EUA</i>
Chang, C. T.	10	0,9	<i>National Cheng Kung University, Taiwan</i>
Isermann, R.	10	0,9	<i>Darmstadt University of Technology, Alemanha</i>
Lee, I. B.	10	0,9	<i>Seoul National University, República da Coréia</i>
Yoon, E. S.	10	0,9	<i>Seoul National University, Coréia do Sul</i>
Himmelblau, D. M.	9	0,8	<i>The University of Texas, EUA</i>
Zhou, D. H.	8	0,7	<i>Tsinghua University, China</i>
Total	116	10,8	-
Demais	948	89,2	-

^(*)Instituição na qual o pesquisador atua.

III.4. PRODUÇÃO CIENTÍFICA BRASILEIRA

Para definir o panorama nacional foi realizada também uma pesquisa na base de dados do banco de teses e dissertações da CAPES (CAPES, 2010). A partir desta pesquisa foi definida a base das análises apresentadas nesta seção. Esta possui 274 teses e dissertações sobre detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais que foram defendidas até o final de 2008.

No Brasil, a pesquisa na área de detecção e diagnóstico de falhas teve início no final da década de 80. As primeiras dissertações de mestrado ligadas a problemas industriais foram defendidas no início da década de 90 e apresentaram aplicações em sistemas mecânicos (Deboni, 1990; Marques, 1994a), tubulações (Naves, 1991; Buiatti, 1995), processos de separação (Teixeira, 1993; Dias, 1994; Bodart, 1995) e, principalmente, em sistemas de controle (Mello, 1991; Fujito, 1992; Wolvovich, 1993; Vieira, 1994; Marques, 1994b). As primeiras teses de doutorado também vieram nesta mesma época (Cardinalli, 1992; Souza, 1994; Kassab Júnior, 1995). A partir de então, houve um crescimento em número de teses e dissertações, de acordo com a Figura III.2, até que a média das defesas realizadas no Brasil atingiu recentemente (2004 a 2008) cerca de 28 trabalhos por ano.

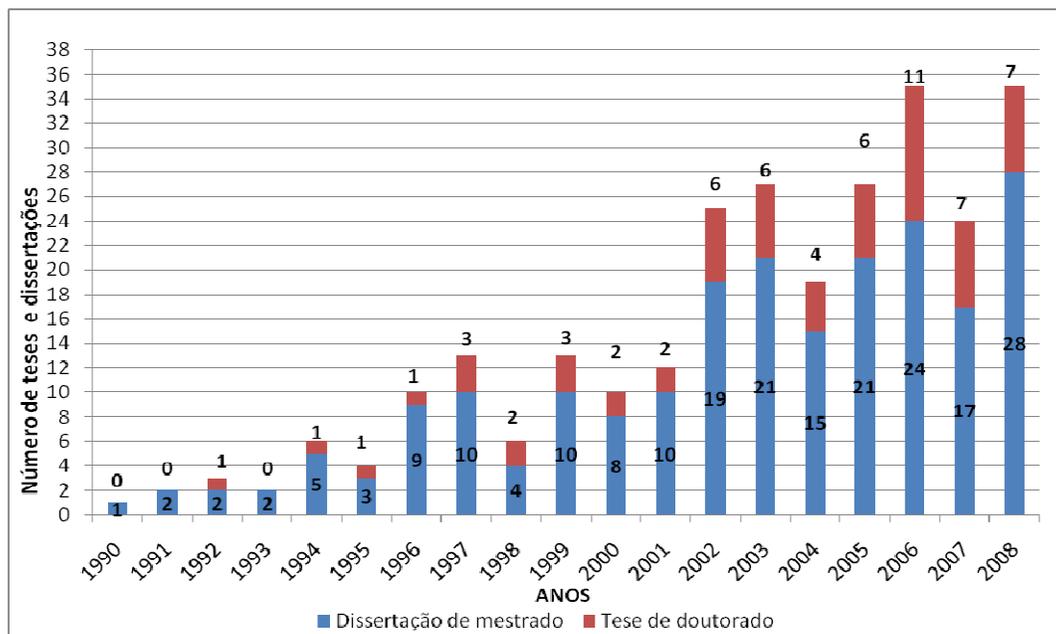


Figura III.2. Teses de doutorado e dissertações de mestrado brasileiras (na área de FDIAC com aplicação em problemas industriais) ao longo dos anos.

As universidades que se destacam com maior número de teses e dissertações publicadas na área ao longo do tempo estão concentradas no sudeste do Brasil (mais da metade do número total). A Universidade de Campinas (UNICAMP), a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a Universidade de São Paulo (USP) são as principais universidades da área em relação ao número de defesas, como pode ser observado na Figura III.3.

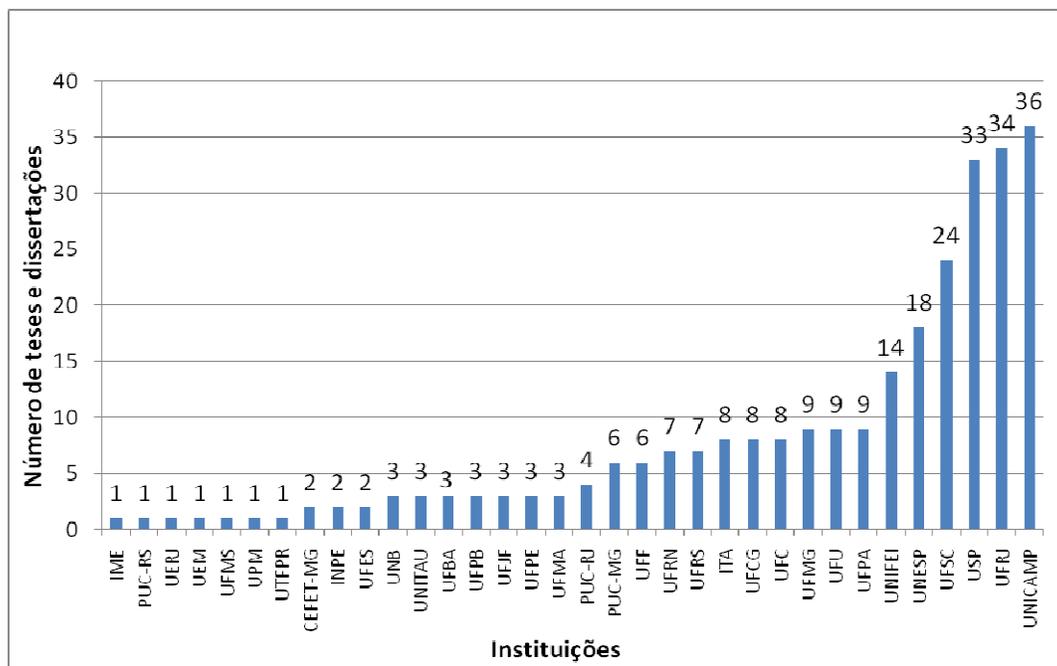


Figura III.3. Número de teses de doutorado e dissertações de mestrado nacionais (na área de FDIAC com aplicação em problemas industriais) por instituição de ensino.

A Figura III.4 retrata as teses e dissertações de todos os tempos distribuídas de acordo com as suas aplicações. É encontrado um maior percentual para os trabalhos com aplicação em sistemas mecânicos e indústrias de manufatura (33%) e em sistemas químicos e indústrias de processos químicos, bioquímicos, farmacêuticos e nucleares (33%), seguidos dos sistemas elétricos e indústrias de geração de energia (27%). São encontrados também trabalhos com outras aplicações (7%), tais como os trabalhos aplicados à indústria têxtil (Proença, 1997) e à distribuição de água (Alexandre, 2005a; Santos, 2006; Soares, 2007). Não foram encontradas teses e dissertações relacionadas às demais aplicações industriais consideradas neste estudo, tais como, aplicações em indústrias alimentícias e metalúrgicas, por exemplo.

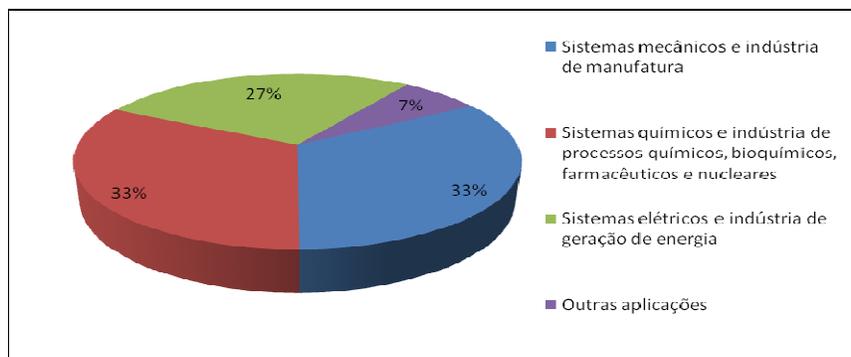


Figura III.4. Distribuição das aplicações industriais das teses e dissertações brasileiras na área de FDIAC.

Os pesquisadores brasileiros com três ou mais produções concluídas, na soma de artigos publicados em periódicos indexados no *Web of Science* e de orientações de teses de doutorado ou dissertações de mestrado, na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais, foram relacionados no Quadro III.1. As orientações concluídas foram relacionadas conforme o tipo de aplicação industrial. No Quadro III.2 foram relacionadas todas as teses e dissertações orientadas na área pelos demais pesquisadores, abrangendo assim toda a base de dados das análises desta seção.

O Quadro III.1 também elenca os grupos de pesquisa do diretório do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) dos respectivos pesquisadores listados (CNPq, 2010). Observa-se que os grupos mostrados não se configuram como grupos que realizam atividades de pesquisa com foco explícito na área de detecção e diagnóstico de falhas. Estes grupos trabalham em diversas outras linhas de pesquisa, e iniciaram atividades de pesquisa na área de FDIAC posteriormente. É possível também observar que, no contexto nacional, são poucos os grupos de pesquisa encontrados que apresentam linhas de pesquisa relacionadas diretamente à área de detecção e diagnóstico de falhas, a menos que as informações constantes do diretório de grupos de pesquisa do CNPq não estejam totalmente consistentes ou completas (neste último caso, seria necessário que o CNPq desenvolvesse um trabalho no sentido de conferir um maior grau de confiança a esta base de dados). É interessante observar ainda que entre os 37 pesquisadores relacionados no Quadro III.1, 22 são bolsistas do CNPq, o que representa aproximadamente 60% do total, mas apenas 1 deles é em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora (DT), sendo todos os demais em Produtividade em Pesquisa (PQ).

Quadro III.1.1. Informações sobre pesquisadores brasileiros(*) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais e seus grupos de pesquisa

Pesquisador	Instituição	PQ ou DT(**)	Grupo	PI	Orientações concluídas			Outros
					SQ	SM	SE	
Adyles Arato Júnior	UNESP	-	Grupo de Tribologia - UNESP (pesquisador).	-	Silva (2001), Mendonça (2002).	Almeida (2008).	-	
Alexandre Pinto Alves da Silva	UFRJ	PQ-1B	-	Silva <i>et al.</i> (1999b), Insfran <i>et al.</i> (1999b).	-	Insfran (1994), Insfran (1999a), Menezes (2006), Souza (2008d).	-	
Amit Bhaya	UFRJ	PQ-1A	-	Kaszakiewicz <i>et al.</i> (1997).	-	Teixeira (1993), Dias (1994), Vieira (1994), Magro (1995), Rivera (2007).	-	
Antonio Marcus Nogueira Lima	UFCCG	PQ-1B	Grupo de Sistemas Embarcados e Computação Pervasiva - UFCCG (pesquisador); Instrumentação Eletrônica e Controle - UFCCG (líder); Redes de Sensores/Atuadores Inteligentes - UFCCG (pesquisador).	Ribeiro <i>et al.</i> (2003a), Ribeiro <i>et al.</i> (2004a).	-	Ribeiro (2003b), Miranda (2007).	-	
Cursino Brandão Jacobina	UFCCG	PQ-1A	-	Ribeiro <i>et al.</i> (2003a), Ribeiro <i>et al.</i> (2004a).	-	Chaves Filho (2001).	-	

(*)Com 3 ou mais produções concluídas, entre artigos publicados em periódicos indexados no Web of Science e orientações de teses (doutorado) ou dissertações (mestrado); (**)PQ ou DT: Bolsista do CNPq; Produtividade em Pesquisa (PQ) ou Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora (DO); PI: Publicações internacionais em periódicos indexados; SQ: Sistemas químicos e indústrias de processos químicos, bioquímicos, farmacêuticos e nucleares; SM: Sistemas mecânicos e indústrias de manufatura; SE: Sistemas elétricos e indústrias de geração de energia.

Quadro III.1 (Continuação). Informações sobre pesquisadores brasileiros(*) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais e seus grupos de pesquisa

Pesquisador	Instituição	PQ ou DT ^(**)	Grupo	PI	Orientações concluídas			Outros
					SQ	SM	SE	
Daniel Kao Sun Ting	USP	-	LADIN - Laboratório de Dinâmica e Instrumentação - USP (pesquisador); Monitoração e Diagnóstico de Plantas Nucleares e Industriais - CNEN (líder).	-	Benevenuti (2004), Bueno (2006), Gonçalves (2006).	Masotti (2006).	-	-
Edison Roberto Cabral da Silva	UFMG	PQ-2	-	Ribeiro <i>et al.</i> (2003a), Ribeiro <i>et al.</i> (2004a).	-	-	Ribeiro (2003b), Lima (2005b).	-
Eugenius Kaszkurewicz	UFRJ	-	-	Kaszkurewicz <i>et al.</i> (1997).	Teixeira (1993), Yamamoto (2001), Reider (2002).	-	-	-
Germano Lambert Torres	UNIFEI	PQ-1B	GAIA - Grupo de Aplicações de Inteligência Artificial - UNIFEI (líder); Grupo de Eletrônica de Potência e Controle Industrial - UNIFEI (pesquisador); Grupo de Pesquisa em Indicadores de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - UNIFEI (líder). Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente - UFESM (pesquisador); Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência - GESEP - UNIPAMPA (pesquisador); NESC - Núcleo de Energia, Sistemas e Comunicação - UFPA (pesquisador).	Silva <i>et al.</i> (1999b), Insfran <i>et al.</i> (1999b).	-	Bonaldi (2002), Assunção (2006), Silva (2008b).	Santos (1996), Insfran (1999a), Arantes (2005), Carrasco (2005).	-
Ghendy Cardoso Júnior	UFESM	-	-	Cardoso <i>et al.</i> (2004), Cardoso <i>et al.</i> (2008).	-	-	Nascimento Júnior (2004), Fantin (2006), Souza (2007).	-

Quadro III.1 (Continuação). Informações sobre pesquisadores brasileiros(*) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais e seus grupos de pesquisa

Pesquisador	Instituição	PQ ou DT ^(**)	Grupo	PI	Orientações concluídas			Outros
					SQ	SM	SE	
Gilberto Pechoto de Melo	UNESP	-	Grupo de Tribologia - UNESP (pesquisador).	-	Marano (2002), Lemos (2004), Morais (2006b), Fernandes (2008).	-	Abreu (2002).	
Giovanni Cordeiro Barroso	UFC	-	GLEN/UFC - UFC (pesquisador); Laboratório de Automação e Sistemas Inteligentes - IFCE (pesquisador).	-	Vieira (2003).	Sampaio (2002), Santos Filho (2007), Medeiros (2008).	-	
Hans Helmut Zürn	UFSC	-	Grupo de Sistemas de Potência - UFSC (pesquisador).	Cardoso <i>et al.</i> (2004), Cardoso <i>et al.</i> (2008), Dalcastagnê <i>et al.</i> (2008).	-	Szlíchta (1997), Silveira (2001), Cardoso Junior (2003), Dalcastagnê (2007).	-	
Jacqueline Gisèle Rolim	UFSC	PQ-2	Grupo de Sistemas de Potência - UFSC (líder).	Cardoso <i>et al.</i> (2004), Morais e Rolim (2006a), Cardoso <i>et al.</i> (2008).	-	Cardoso Junior (2003), Morais (2004), Coser (2006), Torres (2006), Britto (2006), Paulo (2006), Lachman (2007).	-	

Quadro III.1 (Continuação). Informações sobre pesquisadores brasileiros(*) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais e seus grupos de pesquisa

Pesquisador	Instituição	PQ ou DT ^(**)	Grupo	PI	Orientações concluídas		
					SQ	SM	SE
João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira	UNICAMP	-	Sistemas bifásicos e processos de separação - UNICAMP (pesquisador).	Souza <i>et al.</i> (2000a).	Naves (1991), Buiatti (1995), Silva (1996), Cariati (1999), Teixeira (2000), Braga (2001), Antunes (2001), Souza (2002), Macias (2004), Pavan (2005).	-	-
João Antonio Pereira	UNESP	-	Métodos Analíticos e Numéricos em Mecânica Computacional - UNESP (pesquisador).	-	-	Santos (2000), Demarchi (2001), Alexandre (2005b).	Almeida (2008).
Jonny Carlos da Silva	UFSC	-	Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos - LASHIP - UFSC (líder); Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos - NEDIP - UFSC (pesquisador).	-	Alves (2001), Castelani (2003), Star (2006).	-	-
José Luiz de Medeiros	UFRJ	PQ-2	H2CIN - UFRJ (líder); Química Verde e Biotecnologia: Desenvolvimento e Otimização de Processos Limpos - UFRJ (líder); SDVDutos - UFRJ (líder).	-	Coelho (2000), Souza (2004b), Vaz Junior (2006).	-	-

Quadro III.1 (Continuação). Informações sobre pesquisadores brasileiros(*) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais e seus grupos de pesquisa

Pesquisador	Instituição	PQ ou DT(*)	Grupo	PI	Orientações concluídas			Outros
					SQ	SM	SE	
Julio Cesar Stacchini de Souza	UFF	PQ-1D	Análise de Sistemas de Potência - UFF (líder); Grupo Interdisciplinar de Modelagem e Simulação Computacional de Sistemas de Energia - UFF (líder).	Souza <i>et al.</i> (2001), Souza <i>et al.</i> (2004a).	-	-	Rodrigues (1999), Meza (2001), Wanderley (2004).	-
Linilson Rodrigues Padovese	USP	PQ-2	Análise e Projeto de Sistemas Mecânicos - UFCEG (pesquisador); Grupo de Tribologia - UNESP (pesquisador); LADIN - Laboratório de Dinâmica e Instrumentação - USP (líder).	-	-	-	Curi (2002), Rocha (2003), Fujimoto (2005), Vicente (2005).	-
Luis Antônio Aguirre	UFMG	PQ-1B	Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia - UFMG (pesquisador); MACSIN - UFMG (líder); Marcapassos cardíacos - UFMG (pesquisador); Variabilidade da frequência cardíaca - UFMG (líder).	Aguirre e Pereira (1998).	Souza (1996b), Camargo (1997).	-	-	-
Luiz Eduardo Borges da Silva	UNIFEI	DT-1D	GAIA - Grupo de Aplicações de Inteligência Artificial - UNIFEI (líder); Grupo de Eletrônica de Potência e Controle Industrial - UNIFEI (líder).	-	-	-	Bonaldi (2002), Assunção (2006), Bonaldi (2006), Oliveira (2007), Silva (2008d).	Carrasco (2005).
Marco Henrique Terra	USP	PQ-1D	-	Terra e Tinós (2001), Sirqueira <i>et al.</i> (2007), Tinós <i>et al.</i> (2007).	-	-	Tinós (1999), Farfan (2000), Tinós (2003), Sirqueira (2004).	-

Quadro III.1 (Continuação). Informações sobre pesquisadores brasileiros(*) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais e seus grupos de pesquisa

Pesquisador	Instituição	PQ ou DT ^(**)	Grupo	PI	Orientações concluídas			Outros
					SQ	SM	SE	
Marcus Theodor Schilling	UFF	-	Grupo Interdisciplinar de Modelagem e Simulação Computacional de Sistemas de Energia - UFF (líder).	Souza <i>et al.</i> (2001), Souza <i>et al.</i> (2004a).	-	Rodrigues (1999), Meza (2001).	-	
Maurício Bezeira de Souza Júnior	UFRJ	PQ-2	-	-	Alencar (2007), Cunha Neto (2005), Mendonça (2007), Carelli (2008), Silva (2008c).	-	-	
Pyramo Pires da Costa Júnior	PUC-MG	-	Sistemas de Energia Elétrica - PUC Minas (pesquisador).	-	D'Angelo (2000), Faraco (2000), Ribeiro Neto (2006), Moreira (2007b).	Hell (2002), Leite (2007b).	-	
Ricardo Lúcio de Araujo Ribeiro	UFRN	PQ-2	Automação Industrial e Controle de Processos - UFRN (pesquisador); Clima, Ambiente, Saúde e Educação - UFRN (pesquisador).	Ribeiro <i>et al.</i> (2003a), Ribeiro <i>et al.</i> (2004a).	-	Melo (2008)	-	
Roberto Kawakami Harrop Galvão	ITA	PQ-2	Sistemas e controle - ITA (pesquisador).	Paiva <i>et al.</i> (2008).	-	-	Paiva (2003), Matsuura (2006).	
Roberto Schirru	UFRJ	PQ-1C	Fatores Humanos na Engenharia Nuclear - UFRJ (líder).	Alvarenga <i>et al.</i> (1997).	Machado (1996), Alvarenga (1997), Assis (1999), Medeiros (1999).	-	-	

Quadro III.1 (Continuação). Informações sobre pesquisadores brasileiros(*) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais e seus grupos de pesquisa

Pesquisador	Instituição	PQ ou DT ^(**)	Grupo	PI	Orientações concluídas			Outros
					SQ	SM	SE	
Robson Pederiva	UNICAMP	-	Análise de Vibrações em Máquinas e Componentes Mecânicos - UNICAMP (líder).	-	Portari (1997), Chiarello (1998), Melo (1998), Villela (1998), Brito (2002), Eduardo (2003), Lamim Filho (2003), Santiago (2004), Bezerra (2004), Silva (2006), Aquino (2008), Lamim Filho (2008).	-	-	
Rubens Maciel Filho	UNICAMP	PQ-1A	Desenvolvimento e Engenharia de Processos de Separação - UNICAMP (líder); Engenharia de Bioprocessos - UNICAMP (pesquisador); Engenharia de Polimerização - UNICAMP (pesquisador); Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos - FURB (pesquisador); Modelagem, Simulação e Controle de Processos Químicos - UFCC (pesquisador); Otimização, Projeto e Controle Avançado de Processos - UNICAMP (líder); PROTEC - Processos e Tecnologia - UFBA (pesquisador).	-	Cónsul (2002), Gonzaga (2003), Tresmondi (2003).	-	-	

Quadro III.1 (Continuação). Informações sobre pesquisadores brasileiros(*) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais e seus grupos de pesquisa

Pesquisador	Instituição	PQ ou DT ^(**)	Grupo	PI	Orientações concluídas			Outros
					SQ	SM	SE	
Rui Seara	UFSC	PQ-1B	Grupo de pesquisa em circuitos e processamentos de sinais - UFSC (líder).	Dalcastagné <i>et al.</i> (2008).	-	Silveira (2001), Dalcastagné (2007).	-	
Ruth Pastora Saraiva Leão	UFC	-	Grupo de Processamento de Energia e Controle - GPEC - UFC (pesquisador).	-	-	Sampaio (2002), Santos Filho (2007), Medeiros (2008).	-	
Sadek Crisostomo Absi Alfaro	UNB	PQ-1B	Grupo de Automação e Controle - GRACO - UNB (líder).	-	-	Bebiano (2008), Cayo (2008), Franco (2008).	-	
Sandra Lúcia da Cruz	UNICAMP	-	Controle e Automação de Processos Químicos - UNICAMP (pesquisador); Sistemas bifásicos e processos de separação - UNICAMP (pesquisador).	Souza <i>et al.</i> (2000a).	-	Naves (1991), Buiatti (1995), Cariati (1999), Braga (2001), Souza (2002), Macias (2004), Pavan (2005), Sousa (2007).	-	
Takashi Yoneyama	ITA	PQ-1A	Gestão e Economia de Tecnologia de Informação - ITA (pesquisador); Sistemas e Controle - ITA (líder).	Paiva <i>et al.</i> (2008).	-	Fujito (1992), Wada (1996), Matos (2008).	Matsuura (2006).	
Walmir Matos Caminhas	UFMG	PQ-2	Confiabilidade e Manutenção de Sistemas - UFMG (pesquisador); Conversão e Controle da Energia - UFMG (pesquisador); Otimização e Controle em Sist. Dinâmicos - UFMG (pesquisador).	-	-	Silva (2002), Bonfim (2005).	Almeida (2004), Souza (2006). Lelles (2001).	

Quadro III.2. Teses e dissertações orientadas na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais pelos demais pesquisadores brasileiros, não relacionados no Quadro III.1

Pesquisador	Orientações concluídas			Outros
	Sistemas químicos e indústria de processos químicos, bioquímicos, farmacêuticos e nucleares	Sistemas mecânicos e indústria de manufatura	Sistemas elétricos e indústria de geração de energia	
Outros pesquisadores	<p>Mello (1991), Bazan (1992), Wolvovich (1993), Marques (1994b), Bodart (1995), Kassab Junior (1995), Ramos (1996), Araújo (1998), Rossi (2001), Borja (2002), Nogueira (2002), Oliveira (2002), Pinto (2002), Talavera (2002), Wernick (2002), Carneiro (2003), Cascaes (2003), Cavalcante (2003), Lucas (2003), Moura (2003), Peloso (2003), Pereira (2003), Silva (2003), Santos (2004), Beppler (2005), Panta (2005), Silva (2005c), Almeida (2006), Costa (2006b), Guimarães (2006), Martins (2006), Sá (2006), Scucuglia (2006), Vaz Junior (2006), Feldman (2007), Leite (2007a), Moreira (2007a), Rodrigues (2007), Berto Junior (2008), Carmo (2008), Martinelli (2008), Reis (2008), Souza (2008a), Souza (2008b).</p>	<p>Deboni (1990), Cardinali (1992), Marques (1994a), Moraes (1996), Vargas (1996), Cubilla (1997), Mamede (1997), Misari (1997), Mancuzo (1999), Santiago (1999), Santos (1999), Silva (1999a), Veloso (1999), Bernardo (2000), Marçal (2000), Souza (2000c), Dencker (2002), Hirata (2002), Lima (2002), Riascos (2002), Simões (2002), Freixo (2003), Moreno (2003), Passos (2003), Adejoro (2004), Freitas (2004), Gazzana (2004), Matos (2004), Burbano (2005), Carvalho (2005), Morenghi (2005), Oliveira (2005b), Dias (2006), Galotto Junior (2006), Macário (2006), Santos Filho (2006), Almeida (2007), Losso (2007), Menna (2007), Santos (2007), Arco-Verde (2008), Ematsu (2008), Ferreira (2008), Oliveira (2008), Santos (2008).</p>	<p>Costa Junior (1996), Vieira (1996), Biondi Neto (1997), Chechelski (1997), Cota (1997), Domingues (1998), Maia (1998), Montenegro (2001), Almeida Junior (2003), Castillo (2003), Duarte (2003), Pignatari (2003), Ramos (2003), Araújo (2004), Lima (2004), Rocha Neto (2004), Abreu (2005), Almeida (2005), Lima (2005a), Oliveira (2005a), Penteado Neto (2005), Silva (2005a), Souza (2005), Victor (2005), Costa (2006a), Garcia (2006), Gomes (2006), Lanes (2006), Maranhão (2006), Martins (2007), Silva (2007b), Adami (2008), Barbosa (2008), Barros Junior (2008), Benedet (2008), Decanini (2008), Lima (2008), Souza (2008c).</p>	<p>Souza (1994), Caminhas (1997), Olinyk (1997), Proença (1997), Hualpa (1999), Souza (2000b), Carvalho (2002), Destro (2002), Alexandre (2005a), Santos (2006), Silva Filho (2006), Fernandes (2007), Soares (2007), Pereira (2008a), Silva (2008a).</p>

Em periódicos nacionais foram encontrados 17 trabalhos, a partir de pesquisa realizada no SciELO (SciELO, 2010), abrangendo o período 2003 a 2009, já que nem todas as revistas consultadas possuem volumes disponíveis antes desse período.

A maioria dos trabalhos concentra-se na área de sistemas elétricos e indústrias de geração de energia, sendo que 11 dos 17 trabalhos citados foram publicados na revista *Controle & Automação da Sociedade Brasileira de Automática* (Oleskovicz *et al.*, 2003; Macêdo e Coury, 2003; Cardoso Junior. *et al.*, 2004; Sampaio *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2005b; Meza *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2007a; Pereira *et al.*, 2008b; Tinós e Terra, 2008; Ferreira *et al.*, 2009). Os demais trabalhos foram publicados no *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (Riascos *et al.*, 2004; Bachschmid *et al.*, 2004), no *Brazilian Journal of Chemical Engineering* (Souza *et al.*, 2000a; Dondo, 2004; Chetouani, 2008) e na revista *Engenharia Sanitária e Ambiental* (Gumier *et al.*, 2007).

Publicações em periódicos não disponíveis no SciELO também podem ser encontrados em periódicos como *EletroEvolução* (Souza *et al.*, 1996a; Ribeiro Junior *et al.*, 1999; Jardim *et al.*, 2001), *Eletrônica de Potência* (Ribeiro *et al.*, 2004b; Miranda *et al.*, 2005), *Ciência & Engenharia* (Melo e Pederiva, 2000; Pederiva e Melo, 2000) e *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas* (Pereira *et al.*, 1999).

No âmbito internacional, foram encontradas 23 publicações em periódicos indexados, que estão apresentadas de forma resumida no Quadro III.1 e de forma detalhada no Quadro III.3. Comparada ao número de teses e dissertações, a quantidade de trabalhos publicados em periódicos ainda é tímida, principalmente em escala internacional, ficando clara a contribuição científica ainda incipiente do Brasil para a área de FDIAC.

Quadro III.3. Produção científica brasileira publicada em periódicos indexados na Web of Science (WS, 2010) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais

Referência	Título do trabalho	Periódico
Kaszakurewicz <i>et al.</i> (1997)	<i>A fault detection and diagnosis module for oil production plants in offshore platforms</i>	<i>Expert Systems with Applications</i>
Alvarenga <i>et al.</i> (1997)	<i>Adaptive vector quantization optimized by genetic algorithm for real-time diagnosis through fuzzy sets</i>	<i>Nuclear Technology</i>
Aguirre e Pereira (1998)	<i>A modified observer scheme for fault detection and isolation applied to a poorly observed process with integration</i>	<i>Journal of Process Control</i>
Insfran <i>et al.</i> (1999b)	<i>Fault diagnosis using fuzzy sets</i>	<i>Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications</i>
Silva <i>et al.</i> (1999b)	<i>Alarm processing based on associative neural memories with explanatory capability</i>	<i>Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications</i>
Souza <i>et al.</i> (2000a)	<i>Leak detection in pipelines through spectral analysis of pressure signals</i>	<i>Brazilian Journal of Chemical Engineering</i>
Souza <i>et al.</i> (2001)	<i>Fault location in electrical power systems using intelligent systems techniques</i>	<i>IEEE Transactions on Power Delivery</i>
Terra e Tinós (2001)	<i>Fault detection and isolation in robotic manipulators via neural networks: A comparison among three architectures for residual analysis</i>	<i>Journal of Robotic Systems</i>
Ribeiro <i>et al.</i> (2003a)	<i>Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems</i>	<i>IEEE Transactions on Power Electronics</i>
Ribeiro <i>et al.</i> (2004a)	<i>Fault-tolerant voltage-fed PWM inverter AC motor drive systems</i>	<i>IEEE Transactions on Industrial Electronics</i>
Cardoso <i>et al.</i> (2004)	<i>Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation</i>	<i>IEEE Transactions on Power Delivery</i>

Quadro III.3 (Continuação). Produção científica brasileira publicada em periódicos indexados na Web of Science (WS, 2010) na área de detecção e diagnóstico de falhas com aplicação em problemas industriais

Referência	Título do trabalho	Periódico
Souza <i>et al.</i> (2004a)	<i>Alarm processing in electrical power systems through a neuro-fuzzy approach</i>	<i>IEEE Transactions on Power Delivery</i>
Sotomayor e Odloak (2005)	<i>Observer-based fault diagnosis in chemical plants</i>	<i>Chemical Engineering Journal</i>
Evsukoff e Gentil (2005)	<i>Recurrent neuro-fuzzy system for fault detection and isolation in nuclear reactors</i>	<i>Advanced Engineering Informatics</i>
Morais e Rolim (2006a)	<i>A hybrid tool for detection of incipient faults in transformers based on the dissolved gas analysis of insulating oil</i>	<i>IEEE Transactions on Power Delivery</i>
Sotomayor <i>et al.</i> (2007)	<i>Diagnosis of abnormal situations in a continuous solution polymerization reactor</i>	<i>Macromolecular Theory And Simulations</i>
Sirqueira <i>et al.</i> (2007)	<i>Fault-tolerant robot manipulators based on output-feedback H-infinity controllers</i>	<i>Robotics and Autonomous Systems</i>
Tinós <i>et al.</i> (2007)	<i>A fault tolerance framework for cooperative robotic manipulators</i>	<i>Control Engineering Practice</i>
Cardoso <i>et al.</i> (2008)	<i>Identifying the primary fault section after contingencies in bulk power systems</i>	<i>IEEE Transactions on Power Delivery</i>
Dalcastagnê <i>et al.</i> (2008)	<i>An iterative two-terminal fault-location method based on unsynchronized phasors</i>	<i>IEEE Transactions on Power Delivery</i>
Paiva <i>et al.</i> (2008)	<i>A wavelet band-limiting filter approach for fault detection in dynamic systems</i>	<i>IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part A-Systems and Humans</i>
Sirqueira e Terra (2009)	<i>A Fault-Tolerant Manipulator Robot Based on H-2, H-infinity, and Mixed H-2/H-infinity Markovian Controls</i>	<i>IEEE –ASME Transactions on Mechatronics</i>
Almeida <i>et al.</i> (2009)	<i>Intelligent Thermographic Diagnostic Applied to Surge Arresters: A New Approach</i>	<i>IEEE Transactions on Power Delivery</i>

III.5. CONCLUSÃO

O histórico da área de AEM que foi apresentado mostrou que tradicionalmente as tarefas de detecção e diagnóstico estiveram ligadas à área de manutenção, e por esse motivo muitas vezes ainda é tratada dessa forma. Contudo, a tendência atual é a incorporação dessas tarefas pelo setor de automação, pois a automatização das tarefas de detecção e diagnóstico tem gerado sistemas de supervisão com diagnóstico de falhas, como os sistemas de controle tolerantes à falha.

A distribuição das publicações de FDIAC entre os periódicos mostra que os estudos nesta área são um tema de relevância para a engenharia de processos como um todo, sendo observada também, além dos Estados Unidos, uma boa participação dos países asiáticos no desenvolvimento das pesquisas da área.

No Brasil, a pesquisa na área de detecção e diagnóstico de falhas teve início no final da década de 80 e continua se desenvolvendo ao longo dos últimos anos. As teses e dissertações defendidas têm aplicação em sistemas mecânicos e indústrias de manufatura (33%) e em sistemas químicos e indústrias de processos químicos, bioquímicos, farmacêuticos e nucleares (33%), seguidos dos sistemas elétricos e indústrias de geração de energia (27%), além de trabalhos com outras aplicações (7%). Destacam-se com o maior número de teses e dissertações defendidas as universidades do sudeste do Brasil (UFRJ, UNICAMP e USP).

Quantos aos artigos publicados em periódicos nacionais, foram encontrados 17 na base de dados do SciELO (SciELO, 2010), onde a maioria concentra-se na área de sistemas elétricos e indústrias de geração de energia, sendo que a revista Controle & Automação possui mais da metade destes artigos. Comparada ao número de teses e dissertações, a quantidade de trabalhos publicados em periódicos ainda é tímida, principalmente em escala internacional (23 artigos brasileiros na *Web of Science* (WS, 2010)). Sendo assim, o panorama nacional mostra que a contribuição científica brasileira ainda é incipiente na área de FDIAC.

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABNT : Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AEM : *Abnormal Event Management* (gerenciamento de eventos anormais);
CAPES : Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior;
CEFET-MG : Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais;

CNPq	: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico;
FDIAC	: <i>Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction</i> (detecção, diagnóstico (isolamento e análise) e correção de falhas);
IEEE	: <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto dos Engenheiros Elétricos e Eletrônicos);
IFAC	: <i>International Federation of Automatic Control</i> (Federação Internacional de Controle Automático);
IME	: Instituto Militar de Engenharia;
INPE	: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;
ITA	: Instituto Tecnológico de Aeronáutica;
PUC-MG	: Pontifícia Universidade de Minas Gerais;
PUC-RJ	: Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro;
PUC-RS	: Pontifícia Universidade do Rio Grande do Sul;
RAM	: <i>Reliability, Availability and Maintainability</i> (confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade);
SAFEPROCESS	: <i>Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes</i> (Simpósio em Detecção de Falhas, Supervisão e Segurança de Processos Técnicos);
SciELO	: <i>Scientific Electronic Library Online</i> ;
UEM	: Universidade Estadual de Maringá;
UERJ	: Universidade do Estado do Rio de Janeiro;
UFBA	: Universidade Federal da Bahia;
UFC	: Universidade Federal do Ceará;
UFCG	: Universidade Federal de Campina Grande;
UFES	: Universidade Federal do Espírito Santo;
UFF	: Universidade Federal Fluminense;
UFJF	: Universidade Federal de Juiz de Fora;
UFMA	: Universidade Federal do Maranhão;
UFMG	: Universidade Federal de Minas Gerais;
UFMS	: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul;
UFPA	: Universidade Federal do Pará;
UFPB	: Universidade Federal da Paraíba;
UFPE	: Universidade Federal de Pernambuco;

UFRJ	: Universidade Federal do Rio de Janeiro;
UFRN	: Universidade Federal do Rio Grande de Norte;
UFRS	: Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
UFSC	: Universidade Federal de Santa Catarina;
UFSM	: Universidade Federal de Santa Maria;
UFU	: Universidade Federal de Uberlândia;
UNB	: Universidade de Brasília;
UNESP	: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”;
UNICAMP	: Universidade Estadual de Campinas;
UNIFEI	: Universidade Federal de Itajubá;
UNITAU	: Universidade de Taubaté;
UPM	: Universidade Presbiteriana Mackenzie;
USP	: Universidade de São Paulo;
UTFPR	: Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1994). Confiabilidade e manutenibilidade. NBR 5462, *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Abreu, D. S. de (2002). Localização de Falhas Via Observadores de Estado em Sistemas com Excitações Harmônicas Desconhecidas. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Abreu, G. A. F. (2005). Novo Método Híbrido de Reconhecimento de Padrões de Falha em Transformadores de Potência com Aplicação de Redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado, UFBA, Salvador, BA, Brasil;
- Adami, J. F. (2008). Detecção de Arcos de Contorno em Cadeias de Isoladores de Linhas de Transmissão Utilizando Técnicas de Processamento de Sinais. Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Adejoro, A. T. (2004). Avaliação da condição mecânica de turbomáquinas de plataformas e refinarias de petróleo utilizando inteligência artificial. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Aguirre, L. A. & M. F. Pereira (1998). A modified observer scheme for fault detection and isolation applied to a poorly observed process with integration. *Journal of Process Control*, Vol. 8, pp 47-56;

- Alencar, J. R. B. de (2007). Monitoramento do processo industrial de fabricação de formas farmacêuticas sólidas. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Alexandre, A. R. A. (2005a). Identificação de vazamentos em redes de distribuição de água por meio do algoritmo genético com dados transientes. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza, CE, Brasil;
- Alexandre, R. P. (2005b). Redes neurais – aplicação no monitoramento da vida de ferramentas de corte. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Almeida, C. A. de (2004). Diagnóstico Inteligente de Falhas em Pára-Raios. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Almeida, G. R. de (2005). Localização de pequenas perdas de óleo em cabos alta tensão isolados, do tipo of, componentes de linhas de transmissão subterrânea (emendas, terminais e cabos) e soluções de tecnologias para emendas retas of-of. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Almeida, G. M. de (2006). Detecção de situações anormais em caldeiras de recuperação química. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Almeida, F. R. do V. (2007). Análises Estatísticas e Reconhecimento de Padrão Aplicados em Diagnósticos de Defeitos em Rolamentos Através da Análise de Vibração. Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Almeida, F. C. L. de (2008). Diagnóstico automático de falhas em turbinas hidráulicas de pequenas centrais hidroelétricas utilizando técnicas preditivas de manutenção e redes neurais artificiais. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Almeida, C. A. L., A. P. Braga, S. Nascimento, V. Paiva, H. J. A. Martins, R. Torres & W. M. Caminhas, (2009). Intelligent Thermographic Diagnostic Applied to Surge Arresters: A New Approach. *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 24, pp 751-757;
- Almeida Junior, C. de (2003). Sistemas Especialistas para Diagnóstico de Problemas no Sistema de Geração de Energia Elétrica de Uma Refinaria de Petróleo. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Alvarenga, M. A. B. (1997). Diagnóstico do desligamento de um reator nuclear através de técnicas de inteligência artificial. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

- Alvarenga, M. A. B., A. S. Martinez & R. Schirru, (1997). Adaptive vector quantization optimized by genetic algorithm for real-time diagnosis through fuzzy sets. *Nuclear Technology*, Vol. 120, pp 188-197;
- Alves, G. D. (2001). Sistema Especialista Protótipo para Diagnóstico de Falhas em um Sistema Hidráulico Naval. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Andrade, D. T. de (1999). Um ambiente computadorizado para a detecção de diagnose de falhas em sensores de manipulação robótica. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil;
- Antunes, A. J. B. (2001). Detecção de Falhas em um Reator de Pirólise de Etano. Desenvolvimento de um Sistema Baseado em Redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Aquino, M. B. de (2008). Detecção da Condição de Rubbing em Máquinas Rotativas através da Transformada Wavelet. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Arantes, J. G. (2005). Diagnóstico de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência pela Análise de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante através de Redes Neurais. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Araújo, L. C. (1998). Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial no Diagnóstico de Falhas e na Modelagem de uma Planta Piloto de Tratamento de Esgotos. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Araújo, F. O. de (2004). Detecção de falta à terra no serviço auxiliar em corrente contínua das subestações de energia elétrica. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Arco-Verde, M. M. (2008). Identificação de Falhas em Sistemas Rotativos Empregando Técnicas Não- Lineares. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Assis, A. de (1999). Sistema Inteligente para Detecção de Falhas com Raciocínio Não-Monotônico. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Assunção, F. de O. (2006). Técnicas de Análise Preditiva para Falhas Elétricas em Motores de Indução Trifásicos. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;

- Baccarini, L. M. R. (2005). Detecção e Diagnóstico de Falhas em Máquinas de Indução. Tese de Doutorado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Bachschmid, N., P. Pennacchi, & A. Vania, (2004). Diagnostic significance of orbit shape analysis and its application to improve machine fault detection. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.*, Vol .26, n° 2, pp 200-208;
- Barbosa, F. R. (2008). Monitoramento on- line e diagnóstico inteligente da qualidade dielétrica do isolamento líquido de transformadores de potência. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza, CE, Brasil;
- Barros Júnior, W. H. (2008). Detecção, Classificação e Localização de Fontes de Descargas Parciais em Cabos de Alta Tensão Usando Redes Neurais, Enxame de Partículas e o Método LN- FDTD. Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, PA, Brasil;
- Bazan, A. L. C. (1992). Um sistema baseado em conhecimento para fechamento de balanços de massa na produção de celulose. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil;
- Beard, R. V. (1971). Failure accommodation in linear systems through self-reorganization. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, MIT, Massachusetts, USA;
- Bebiano, D. F. V. (2008). Monitoração e Localização de Defeitos na Soldagem TIG Utilizando Técnicas de Espectrometria. Dissertação de Mestrado, UNB, Brasília, Brasil;
- Benedet, M. E. (2008). Otimização de um analisador de gás dissolvido em óleo de múltiplos transformadores de potência. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Benevenuti, E. de L. (2004). Metodologia para Monitoração e Diagnóstico de Vibração das Bombas Moto-Operadas do Circuito Primário de Refrigeração do Reator IEA-R1. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Beppler, R. V. (2005). Detecção de falhas de adesão de revestimentos de materiais compostos usados na indústria do petróleo usando métodos ópticos. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Bernardo, J. I. (2000). Proposta de monitoramento computadorizado de vibrações em máquinas rotativas: uma ferramenta virtual para a manutenção. Dissertação de Mestrado, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil;

- Berto Junior, C. A. (2008). Sistema de Monitoramento de Falhas em Tubulações por meio de Processamento Digital de Sinais. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Bezerra, R. de A. (2004). Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Biondi Neto, L. (1997). Sistema Híbrido de Apoio à Decisão para Detecção e Diagnóstico de Falhas em Redes Elétricas. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Bodart, C. P. (1995). Sistema Híbrido; Rede Neural Integrada com Sistema Especialista para Diagnostico de Falhas. Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Bonaldi, E. L. (2002). Manutenção Preditiva em Motores de Indução Trifásicos através do Espectro da Corrente do Estator. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Bonaldi, E. L. (2006). Diagnóstico Preditivo de Avarias em Motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados. Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Bonfim, C. H. de M. (2005). Detecção e Diagnóstico de Falhas em Dutos de Petróleo e de seus Derivados. Diagnóstico Inteligente de Falhas em Pára- Raios. Tese de Doutorado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Borja, J. A. T. (2002). Metodologia, Detecção e Diagnóstico de Falhas em Sistemas de Refrigeração Usando Redes Neurais. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, Brasil;
- Braga, C. F. (2001). Detecção de Vazamentos por Computador 'On-line' em Tubulações Transportando Misturas Gás-Líquido. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Brito, J. N. (2002). Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicas. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Britto, T. M. de (2006). Metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade Aplicada A Pára-Raios de Alta Tensão. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;

- Bueno, E. I. (2006). Utilização de redes neurais artificiais na monitoração e detecção de falhas em sensores do reator IEA-R1. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Buiatti, C. M. (1995). Monitoramento de tubulações por técnicas computacionais on-line. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Burbano, C. E. R. (2005). Diagnóstico de Falhas em Máquinas Rotativas. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, Brasil;
- Camargo, H. A. (1997). Detecção de Isolamento de Falhas Utilizando Estimativa de Parâmetros de Modelos Contínuos e Limites de Confiança Adaptativos. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Caminhas, W. M. (1997). Estratégias de Detecção e Diagnóstico de Falhas em Sistemas Dinâmicos. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- CAPES (2010). Banco de Teses da CAPES, *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)*. Disponível em: [<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/>]. Acessado entre Janeiro e Fevereiro de 2010;
- Cardinalli, R. (1992). Modelagem e aplicações em diagnose de maquinas verticais. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Cardoso, G., J. G. Rolim & H. H. Zurn, (2004). Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation. *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 19, pp 1034-1041;
- Cardoso, G., J. G. Rolim & H. H. Zurn (2008). Identifying the primary fault section after contingencies in bulk power systems. *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 23, pp 1335-1342;
- Cardoso Junior, G. (2003). Estimativa da Seção em Falta em Sistemas Elétricos de Potência via Redes Neurais e Sistemas Especialistas Realizada em Nível de Centro de Controle. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Cardoso Junior, G., J. G. Rolim & H. H. Zürn, (2004). Diagnóstico de faltas em sistemas de potência: definição do problema e abordagens via inteligência artificial. *Controle & Automação*, Vol. 15, n° 2, pp 215-229;
- Carelli, A. C. (2008). Avaliação de desempenho estocástico e determinístico de controladores PID e preditivo: aplicação a um reator de hidrotreatamento. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

- Cariati, S. A. (1999). Detecção de Vazamentos por Computador on-line em Tubulações transportando Líquido e Misturas Gás-Líquido. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Carmo, E. A. do (2008). Um Sistema Fuzzy- Neural para Estimação de Vazões de Petróleo e Gás. Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, PA, Brasil;
- Carneiro, A. L. G. (2003). Desenvolvimento de sistema de monitoração e diagnóstico aplicado a válvulas moto-operadas utilizadas em centrais nucleares. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Carrasco, A. C. (2005). Sistema de Detecção de Falhas de Manobras em Seccionadores de Alta Tensão Baseado em Processamento Digital de Sinal e RNA. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Carvalho, A. M. de (2002). Identificação de defeitos em tubulações metálicas utilizando redes neurais artificiais e o método dos elementos finitos. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Carvalho, J. A. S. de (2005). Diagnóstico da condição operacional: abordagem para análise de falha de equipamentos. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Cascaes, G. M. (2003). Gerenciamento de Processos em Controladores Programáveis Usando XML. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil;
- Castelani, M. R. (2003). Sistema Especialista para o Gerenciamento Operacional de Redes de Distribuição de Gás Natural. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Castillo, E. V. (2003). Aplicação de Onotologia e Sistema Especialista para Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Cavalcante, F. P. (2003). Técnicas de diagnóstico de falhas para dessalinizadores de pequeno porte instalados no interior do ceará e propostas de melhorias. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza, CE, Brasil;
- Cayo, E. H. (2008). Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos na Solda Baseada no Sensoriamento da Pressão Acústica do Arco Elétrico no Processo GMAW-S. Dissertação de Mestrado, UNB, Brasília, Brasil;
- Chaves Filho, J. E. (2001). Estimação de Parâmetros e Detecção de Faltas Incipientes de Máquinas Assíncronas. Tese de Doutorado, UFPB, João Pessoa, PB, Brasil;

- Chechelski, P. A. (1997). Sistema para diagnóstico de faltas em alimentadores radiais de 13,8 kV baseado em redes neurais artificiais. Dissertação de Mestrado, UTFPR, Curitiba, PR, Brasil;
- Chetouani, Y. (2008). Design of a multi-model observer-based estimator for fault detection and isolation (FDI) strategy: application to a chemical reactor. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 25, pp 777-788;
- Chiang, L. H., E. L. Russel & R. D. Braatz (2001). Fault detection and diagnosis in industrial systems. 1. ed., *Springer*, London, UK;
- Chiarello, A. G. (1998). Detecção e Localização de Falhas em Sistemas Mecânicos Estacionários através de Funções de Correlação. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- CNPq (2010). Diretório dos grupos de pesquisa do CNPq, *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)*. Disponível em: [<http://dgp.cnpq.br/buscaoperacional/>]. Acessado entre Janeiro e Fevereiro de 2010;
- Coelho, R. M. L. (2000). Reconciliação Não Linear de Dados Aplicado à Detecção de Vazamentos em Redes Estacionárias de Escoamento Incompressível. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Cónsul, C. M. D. (2002). Técnicas Estatísticas Multivariadas para o Monitoramento de Processos Industriais Contínuos. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Coser, J. (2006). Contribuições aos Métodos para Localização de Faltas em Alimentadores de Distribuição. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Costa, F. B. (2006a). Detecção e Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet. Dissertação de Mestrado, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil;
- Costa, H. R. do N. (2006b). Aplicação de técnicas de inteligência artificial em processos de fabricação de vidro. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Costa Junior, L. R. C. (1996). Sistema de Conhecimento para Diagnóstico de Máquinas Hidrogeradoras. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Cota, E. F. (1997). ATPG para Teste de Circuitos Analógicos e Mistos. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil;

- Cubilla, R. M. (1997). Detecção de falhas em motores de indução trifásicos com rotor de gaiola em funcionamento. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Cunha Neto, J. V. (2005). Controle e introdução ao diagnóstico de um reator químico. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Curi, E. I. M. (2002). Sistema de monitoramento e detecção de transição de regime de lubrificação em mancal de deslizamento. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- D'Angelo, M. F. S. V. (2000). Diagnóstico de Falhas no Enrolamento de Campo da Máquina Síncrona Utilizando Técnicas de Inteligência Artificiais. Dissertação de Mestrado, PUC-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Dalcastagnê, A. L. (2007). Método Iterativo para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão a Partir de Fasores Não-Sincronizados. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Dalcastagnê, A. L., S. Noceti, H. H. Zurn & R. Seara, (2008). An iterative two-terminal fault-location method based on unsynchronized phasors. *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 23, pp 2318-2329;
- Deboni, J. E. (1990). Monitoração e detecção de falhas em sistemas mecânicos pela modelagem e estimação de estado. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Decanini, J. G. M. S. (2008). Detecção e Classificação de Falhas de Curto-Circuito em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Usando Lógica Nebulosa. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Demarchi, D. (2001). Técnicas não Destrutivas de Monitoramento e Detecção de Falhas Estruturais Utilizando Redes Neurais. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Dencker, F. A. (2002). Detecção de Falha na Montagem de Compressores Herméticos por Redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Destro, R. de C. (2002). Diagnóstico de defeitos em sistemas complexos. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;

- Dias, A. da C. (1994). Avaliação da metodologia “Diagnostic model processor” para diagnóstico de falhas em processo de separação. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Dias, C. G. (2006). Proposta de um novo método para a detecção de barras rompidas em motores de indução com rotor em gaiola. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Domingues, E. T. (1998). Localizador digital de faltas para linhas de transmissão de múltiplos terminais. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Dondo, R. (2004). Measurement processing for state estimation and fault identification in batch fermentations. *Braz. J. Chem. Eng.*, Vol. 21, nº 3, pp 367-392;
- Duarte, A. N. (2003). Tratamento de eventos em redes elétricas: uma ferramenta. Dissertação de Mestrado, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil;
- Eduardo, A. C. (2003). Diagnóstico de Defeitos em Sistemas Mecânicos Rotativos Através da Análise de Correlações e Redes Neurais Artificiais. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Ematsu, M. Y. (2008). Análise Espectral da Corrente de Partida de Motores de Indução para Detecção de Falhas nas Barras do Rotor. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Evsukoff, A. & S. Gentil (2005). Recurrent neuro-fuzzy system for fault detection and isolation in nuclear reactors. *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 19, pp 55-66;
- Fantin, K. V. (2006). Sistema Especialista Fuzzy para Diagnóstico de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência Via Análise de Óleo Isolante. Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, PA, Brasil;
- Faraco, R. A. L. (2000). Detecção de Faltas Elétricas em Motores de Indução Utilizando Redes Neurais. Dissertação de Mestrado, PUC-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Farfan, D. V. (2000). Controladores Markovianos aplicados a um robô manipulador subatuado. Dissertação de Mestrado, USP, São Carlos, SP, Brasil;
- Feldman, R. N. (2007). Reconciliação de dados em tempo real para monitoração e detecção de falhas em terminal de transporte e armazenamento de derivados de petróleo. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

- Fernandes, R. G. (2007). Detecção e isolamento de falhas em sistemas dinâmicos baseados em redes neurais. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, Brasil;
- Fernandes, F. V. (2008). Diagnose de falhas via observadores de estado em sistemas mecânicos com absorvedores dinâmicos de vibrações tipo lâmina vibrante. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Ferreira, R. J. P. (2008). Modelagem em Manutenção Preditiva: Um Modelo Estatístico para Diagnóstico e Um Modelo de Decisão Multicritério para Inspeção. Tese de Doutorado, UFPE, Recife, PE, Brasil;
- Ferreira, D. D., C. A. G. Marques, A. S. Cerqueira, C. A. Duque & M. V. Ribeiro (2009). Sistema automático de detecção e classificação de distúrbios elétricos em qualidade da energia elétrica. *Controle & Automação*, Vol. 20, nº 1, pp 53-62;
- Franco, F. D. (2008). Monitorização e Localização de Defeitos na Soldagem TIG através do Sensoriamento Infravermelho. Dissertação de Mestrado, UNB, Brasília, Brasil;
- Frank, P. M. (1990). Fault diagnosis in dynamic-systems using analytical and knowledge-based redundancy. *Automatica*, Vol. 26, pp 459-474;
- Freitas, A. E. S. (2004). Um modelo de classificação de exceções baseado em redes Kohonen ajustadas por algoritmos genéticos. Dissertação de Mestrado, UFBA, Salvador, BA, Brasil;
- Freixo, C. S. (2003). Uma Metodologia para reconhecimento "on-line" de padrões de sinais de vibração. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Fujimoto, R. Y. (2005). Diagnóstico automático de defeitos em rolamentos baseado em lógica fuzzy. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Fujito, E. T. (1992). Detecção, isolamento e acomodação de faltas em sistemas de controle utilizando técnica de sistema baseado no conhecimento. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil;
- Galotto Junior, L. (2006). Análise de compensação de falta em sensores, aplicada em controle de motores. Dissertação de Mestrado, UFMS, Campo Grande, MS, Brasil;
- Garcia, D. A. de A. (2006). Metodologia de diagnóstico automático de falhas de curto-circuito em alimentadores primários de sistemas de distribuição reticulados tipo Spot. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, Brasil;

- Gazzana, D. da S. (2004). Detecção e diagnóstico de Falhas em Motores de Indução utilizando o Método de assinatura de Corrente e Lógica Fuzzy. Dissertação de Mestrado, PUC-RS, Porto Alegre, RS, Brasil;
- Gomes, C. R. (2006). Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando decomposição Harmônica e redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, PA, Brasil;
- Gonçalves, I. M. P. (2006). Monitoração e diagnóstico para detecção de falhas de sensores utilizando a metodologia GMDH. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Gonzaga, J. C. B. (2003). Integração de processos em tempo real para monitoramento e controle: aplicação para planta de PET. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Guimarães, F. S. (2006). Um Sistema Multi- Agentes para Monitoramento e Aquisição em Tempo Real. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Gumier, C. C. & E. Luvizotto Junior (2007). Aplicação de modelo de simulação-otimização na gestão de perda de água em sistemas de abastecimento. *Eng. Sanit. Ambient.*, Vol.12, nº 1, pp 32-41;
- Halim, E. B., M. A. A. S. Choudhury, S. L. Shah & M. J. Zuo (2006). Fault detection of rotating machinery from Bicoherence analysis of vibration data. *Sixth IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Vol. 6, Part 1;
- Hell, M. B. (2002). Sistemas de diagnóstico de faltas em transformadores de potência utilizando análise de gases dissolvidos e técnicas de inteligência computacional. Dissertação de Mestrado, PUC-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Himmelblau, D. M. (1978). Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes. *Elsevier*, Amsterdam, Netherlands;
- Hirata, W. T. (2002). Projeto e Desenvolvimento de Um Sistema de Monitoramento de Máquinas Rotativas. Dissertação de Mestrado, UNITAU, Taubaté, SP, Brasil;
- Huallpa, B. N. (1999). Detecção e diagnóstico de falhas em sistemas dinâmicos utilizando redes neurais e lógico nebulosa. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- IEEE (2009). The world's leading professional association for the advancement of technology. Disponível em: [<http://www.ieee.org/portal/site/iportals?WT>].

- mc_id=hplogo_upleft], *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, acessado em 31/07/2009;
- IFAC (2009). IFAC PapersOnLine. Disponível em: [Overview – IFAC – International Federation of Automatic Control: <http://www.ifac-control.org/about/overview>, International Federation of Automatic Control (IFAC), acessado em 3/08/2009;
- Insfran, A. H. F. (1994). Detecção de faltas em subestações de potência usando redes neurais. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Insfran, A. H. F. (1999a). Sistema Integrado de Diagnóstico de Eventos em Sistemas de Potência de Grande Porte. Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Insfran, A. H., A. P. Silva & G. Lambert-Torres (1999b). Fault diagnosis using fuzzy sets. *Engineering Intelligent Systems For Electrical Engineering and Communications*, Vol. 7, pp 177-182;
- Isermann, R. & P. Ballé (1997). Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control Engineering Practice*, Vol. 5, pp 709-719;
- Jardim, J. L. A., C. A. Silva Neto, A.P.A. da Silva, A. C. Z. de Souza, D. M. Falcão, C. L. T. Borges & G. N. Taranto, (2001). A Unified Online Security Assessment System. *EletoEvolução*, Vol. 23, nº 23, pp 36-40;
- Jones, H. L. (1973). Failure detection in linear systems. Ph.D. Thesis, MIT, Massachusetts, USA;
- Kassab Junior, F. (1995). Estabilidade adaptativa robusta: uma aplicação de algoritmos paralelos em controle tolerante a falhas. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Kaszkurewicz, E., A. Bhaya & N. F. Ebecken (1997). A fault detection and diagnosis module for oil production plants in offshore platforms. *Expert Systems With Applications*, Vol. 12, pp 189-194;
- Lachman, M. (2007). Sistema de Monitoração Remota e Avaliação do Estado Operativo de Transformadores de Potencial Capacitivos (TPCs) Instalados em Subestações em Operação. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Lamim Filho, P. C. M. (2003). Acompanhamento preditivo de motores de indução trifásicos através da análise de fluxo magnético. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;

- Lamim Filho, P. C. M. (2008). Monitoramento permanente de motores de indução trifásicos. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Lanes, M. M. (2006). Limitador Eletrônico de Corrente de Curto- Circuito Baseado em Circuito Ressonante Controlado por Dispositivos Semicondutores de Potência. Dissertação de Mestrado, UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil;
- Leite, A. C. (2007a). Detecção e diagnóstico de falhas em sensores e atuadores da plataforma multi-missão. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, SP, Brasil;
- Leite, D. F. (2007b). Sistema de Diagnóstico de Falhas em Máquinas Elétricas de C.A.. Dissertação de Mestrado, PUC-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Lelles, I. de O. (2001). Detecção de falhas em sistemas dinâmicos utilizando observadores em modos deslizantes e redes neurais: um estudo de caso. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Lemos, G. F. (2004). Detecção de Falhas via Observadores de Estado em Sistemas Rotativos, considerando-se suas Fundações. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Lima, J. do E. S. (2002). Método de cálculo de vibração torcional em geradores diesel e sua aplicação como ferramenta de diagnóstico de defeitos na combustão dos cilindros do motor. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Lima, J. N. de (2004). Monitoramento e Diagnóstico de Estado de Disjuntores de Alta e Extra Alta Tensão como Técnica de Manutenção Preventiva. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife, PE, Brasil;
- Lima, S. E. U. de (2005a). Diagnóstico Inteligente de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência Utilizando a Análise dos Gases Dissolvidos em Óleo. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza, CE, Brasil;
- Lima, W. S. (2005b). Contribuição ao Estudo de Identificação e Compensação de Falhas em Inversor Multinível com Diodos Grampeadores. Dissertação de Mestrado, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil;
- Lima, S. L. de (2008). Diagnóstico de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência utilizando a Teoria da Extensão. Dissertação de Mestrado, UFMA, São Luís, MA, Brasil;
- Losso, G. S. (2007). Detecção de Falhas de Motores de Combustão Interna a Pistão. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil;

- Lucas, A. H. (2003). Detecção de Vazamentos em Linhas de Transmissão de Líquidos. Dissertação de Mestrado, UFF, Niteroi, RJ, Brasil;
- Macário, C. C. L. (2006). Utilização de Filtros Adaptativos para Detecção de Falhas em Mancais de Rolamentos. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, Brasil;
- Macêdo, R. A. & D. V. Coury (2003). Um esquema completo para proteção rápida de linhas de transmissão com o uso de equações diferenciais. *Controle & Automação*, Vol. 14, nº 2, pp 176-186;
- Machado, L. (1996). Modelagem do conhecimento para sistema de monitoração de segurança em tempo real para usinas nucleares. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Macias, I. B. (2004). Detecção de Vazamentos em Tubulações Transportando Gás. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Magro, P. P. (1995). Diagnóstico de falhas em um subsistema protótipo de produção de uma plataforma utilizando SDG. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Maia, W. U. L. de A. (1998). Sistema Integrado de Operação e Diagnóstico de Falhas para Sistemas de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Mamede, W. F. (1997). Análise de Falhas em Redutores Utilizando Transformada de Wavelet. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, Brasil;
- Mancuzo, M. V. (1999). Detecção Automática de Falhas em Motores de Combustão Utilizando Rede Neural. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, Brasil;
- Maranhão, G. N. de A. (2006). Avaliador Fuzzy para Diagnósticos de Falhas em Geradores Síncronos Usando Identificação Paramétrica. Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, PA, Brasil;
- Marano, J. H. (2002). Localização de Falhas Via Observadores de Estado em Sistemas com Variações de Parâmetros. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Marçal, R. F. M. (2000). Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibração e lógica fuzzy. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil;

- Marques, A. L. de P. (1994a). Diagnose e análise de falhas em rolamentos por análise de vibrações. Dissertação de Mestrado, UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil;
- Marques, R. P. (1994b). Detectores de falhas em controle de processos. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Martinelli, S. H. S. (2008). Detecção de Defeitos em Caldeiras de Recuperação Química. Tese de Doutorado, UEM, Maringá, PR, Brasil;
- Martins, R. S. (2006). Sistema Inteligente para Detecção de Vazamentos em Dutos de Petróleo usando Transformada Wavelet e Redes Neurais. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, Brasil;
- Martins, H. J. A. (2007). Diagnóstico de transformadores de potência através de metodologias no domínio da frequência. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Masotti, P. H. F. (2006). Metodologia de Monitoração e Diagnóstico Automatizado de Rolamentos Utilizando Lógica Paraconsistente, Transformada de Wavelet e Processamento de Sinais Digitais. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Matos, B. B. de (2004). Detecção de falhas induzidas pelo hidrogênio via emissão acústica. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Matos, M. S. (2008). Controle preditivo com múltiplos modelos para a acomodação de falhas. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil;
- Matsuura, J. P. (2006). Detecção de falhas em sistemas dinâmicos com redes bayesianas aprendidas a partir de estimação de estados. Tese de Doutorado, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil;
- Medeiros, J. A. C. C. (1999). Modelo de Sistema de Monitoração e Diagnóstico Baseado em Agentes. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Medeiros, E. B. (2008). Sistema de Diagnóstico de Falta Integrado ao Sistema de Supervisão e Controle. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza, CE, Brasil;
- Mello, A. F. de (1991). Detecção e identificação de falhas em sistemas de controle lineares usando uma modificação do filtro de detecção. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, SP, Brasil;
- Melo, G. P. de (1998). Detecção e Localização de Falhas Via Observadores de Estado de Ordem Reduzida. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;

- Melo, G. P. & R. Pederiva, (2000). Performance Analysis of Robust State Observers in Faults Isolation. *Ciência & Engenharia*, Vol. 9, n° 2, pp 88-93;
- Melo, L. C. A. (2008). Contribuições na Detecção e Identificação de Falhas em Inversores Multiníveis. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, Brasil;
- Mendonça, A. E. R. de (2002). Aplicação de Redes Neurais Artificiais na Identificação de Falhas em Redutores Mecânicos de Engrenagens. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Mendonça, E. S. (2007). Monitoramento, diagnóstico e otimização operacional de uma unidade de processamento de gás natural. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Menezes, H. B. de (2006). Diagnóstico Remoto e Filtragem de Dados da Telemedição de Sistemas Elétricos de Potência. Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Menna, A. R. (2007). Detecção de falhas em mancais de rolamento por análise de vibrações em banda larga: um caso prático de aplicação em uma população de equipamentos rotativos. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil;
- Meza, E. B. M. (2001). Localização de Defeitos em Sistemas de Potência Utilizando um Modelo. Dissertação de Mestrado, UFF, Niteroi, RJ, Brasil;
- Meza, E. B. M., J. C. Stacchini de Souza, M. Th. Schilling & M. B. Do Coutto Filho. (2006) Utilização de um modelo neuro-fuzzy para a localização de defeitos em sistemas de potência. *Controle & Automação*, Vol. 17, n° 1, pp 103-114;
- Miranda, R. S., C. B. Jacobina, A. M. N. Lima, M. B. R. Corrêa & L. A. S. Ribeiro, (2005). Operação de um sistema de acionamento com motor de seis fases tolerante a faltas. *Eletrônica de Potência*, Vol. 10, n° 1, pp 15-22;
- Miranda, R. S. (2007). Sistemas de Acionamentos CA Multifases com Estratégias de Controle Tolerante a Faltas e Redução da Tensão de Modo Comum. Tese de Doutorado, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil;
- Misari, J. A. U. (1997). Análise de defeitos no motor de indução trifásico para predição de falhas incipientes. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Mok, H. T., C. W. Chan & Z. Y. Yang, (2006). Online fault detection and isolation of nonlinear systems based on neurofuzzy networks. *Sixth IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Vol. 6, Part 1;

- Montenegro, A. C. (2001). Um Sistema Modular de Diagnóstico em Tempo Real de Causas de Desligamentos em Sistemas Elétricos de Potência. Dissertação de Mestrado, UFMA, São Luís, MA, Brasil;
- Moraes, F. J. V. de (1996). Teoria wavelet aplicada a análise de vibrações. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Morais, D. R. (2004). Ferramenta Inteligente para Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Morais, D. R. & J. G. Rolim (2006a). A hybrid tool for detection of incipient faults in transformers based on the dissolved gas analysis of insulating oil. *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 21, pp 673-680;
- Morais, T. S. (2006b). Diagnóstico de falhas via observadores de estado com excitações desconhecidas, identificadas via funções ortogonais. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Moreira, E. V. (2007a). Aplicação da radiografia digital utilizando detectores planos para inspeção de soldas de gasodutos e detectores planos para inspeção de soldas de gasodutos e oleodutos. Dissertação de Mestrado, UNITAU, Taubaté, SP, Brasil;
- Moreira, S. de C. (2007b). Detecção e Diagnóstico de Falta via Estatística Multivariada e Redes Neurais. Dissertação de Mestrado, PUC-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Morenghi, L. C. R. (2005). Proposta de um sistema integrado de monitoramento para manutenção. Dissertação de Mestrado, USP, São Carlos, SP, Brasil;
- Moreno, Y. M. B. (2003). Aplicação de sistemas nebulosos e neuro- nebulosos para o diagnóstico de falhas em máquinas rotativas. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Moura, J. P. de (2003). Sistema Especialista para Identificação de Falhas e Tomada de Decisão. Dissertação de Mestrado, UFMA, São Luís, MA, Brasil;
- Nascimento Júnior, M. S. (2004). Aplicação de Redes Neurais Artificiais no Processamento de Alarmes em Sistemas Elétricos Industriais. Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, PA, Brasil;
- Naves, G. J. (1991). Técnicas de computação em tempo real em controle e supervisão de tubulações. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;

- Noguerol, A. R. (2002). Correção de Alarmes e Diagnóstico no Gerenciamento de Sistemas Supervisionados por Computador. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil;
- Oleskovicz, M., D. V. Coury, & R. K. Aggarwal, (2003). O emprego de redes neurais artificiais na detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão. *Controle & Automação*, Vol. 14, n° 2, pp 138-150;
- Olijnyk, J. C. (1997). Análise de Regimes e Grafos como uma Técnica Integrada de Raciocínio Qualitativo para Diagnóstico de Falhas. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil;
- Oliveira, A. A. de (2002). Implantação de um Sistema de Detecção de Vazamentos em Oleodutos com Tratamento de Alarmes Falsos. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, Brasil;
- Oliveira, A. R. de (2005a). Redes Neurais Artificiais Aplicadas à Detecção, Classificação e Localização de Defeitos em Linhas de Transmissão. Dissertação de Mestrado, UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil;
- Oliveira, R. J. G. de (2005b). Implementação de técnicas de processamento de sinais para o monitoramento da condição de mancais de rolamento. Dissertação de Mestrado, UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil;
- Oliveira, T. M. de (2007). Manutenção Preditiva de Motores de Corrente Contínua com Ênfase em MCSA. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Oliveira, L. P. de (2008). Diagnóstico de falhas em máquinas rotativas por análise de vibrações. Dissertação de Mestrado, UFF, Niterói, RJ, Brasil;
- Paiva, H. M. (2003). Detecção de Falhas em Sistemas Dinâmicos Empregando Transformadas Wavelet Adaptativas. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil;
- Paiva, H. M., R. K. H. Galvão & T. Yoneyama, (2008). A wavelet band-limiting filter approach for fault detection in dynamic systems. *IEEE Transactions On Systems Man and Cybernetics Part A-systems and Humans* , Vol. 38, pp 680-687;
- Palma, L. F. (2006). Fault detection, diagnosis and fault tolerance approaches in dynamic systems based on black-box models. Tese de Doutoraento, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal;
- Panta, P. E. G. (2005). Monitoração de robô de inspeção interna de oleodutos GIRINO. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

- Passos, J. D. (2003). Implementação de Um Sistema de Monitoramento e Proteção de Compressores de Ar a Alta Pressão. Dissertação de Mestrado, UNITAU, Taubaté, SP, Brasil;
- Paulo, A. R. G. da S. (2006). Diagnóstico de Descargas Parciais em subestações Isoladas a Gás SF6 Utilizando Redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Pavan, A. M. (2005). Detecção On-Line de Vazamentos em Vasos de Pressão Utilizando Sistemas Sônicos. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Pederiva, R. & G. P. Melo, (2000). Análise de Desempenho de Observadores de Estado Robustos na Localização de Falhas. *Ciência & Engenharia*, Vol. 9, nº 2, pp 88-93;
- Peloso, A. L. (2003). Implementação de uma Rede de Dispositivos Microprocessados Distribuída para Aplicações de Controle e Supervisão. Dissertação de Mestrado, UFES, Vitória, ES, Brasil;
- Penteado Neto, R. de A. (2005). Sistema para detecção de falta de alta impedância e de rompimento de condutores em redes de distribuição de energia elétrica. Tese de Doutorado, UFPR, Curitiba, PA, Brasil;
- Pereira, J. A., V. Lopes Jr. & H. I. Weber, (1999). Automation in Fault Detection Using Neural Network and Model Updating. *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, Vol. XXI, pp 99-108;
- Pereira, C. A. (2003). Análise da Incerteza Associada à Localização de Vazamentos em Tubulações Transportando Bateladas. Dissertação de Mestrado, UFF, Niteroi, RJ, Brasil;
- Pereira, D. A. (2008a). Projeto de filtros para detecção de falhas usando a norma H-infinito. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Pereira, R.A.F., Luis G. W. da Silva & J.R.S. Mantovani, (2008b). Algoritmo baseado em afundamentos de tensão para localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica. *Controle & Automação*, Vol.19, nº 3, pp 337-349;
- Pignatari, J. G. C. (2003). Proposta de Sistema Multi Agente Inteligente Para Controle Decisório e Restabelecimento de Redes de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado, UPM, São Paulo, SP, Brasil;

- Pinto, L. A. (2002). Diagnósticos de Falhas em Processos Industriais com uma Abordagem de Reconhecimento de Padrões. Dissertação de Mestrado, UFES, Vitória, ES, Brasil;
- Portari, M. V. (1997). Diagnóstico de Defeitos em Equipamentos Utilizando Métodos Estatísticos de Reconhecimento de Padrões. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Proença, C. B. (1997). Investigação para Detecção Automática de Falhas em Tecidos Têxteis. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Ramos, A. C. B. (1996). O processamento do conhecimento para a operação e o controle de processos dos sistemas críticos de tempo real de uma refinaria de petróleo. Tese de Doutorado, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil;
- Ramos, F. R. (2003). Sistema Digital de Detecção e Pré-compactação de Eventos Elétricos. Dissertação de Mestrado, UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil;
- Reider, C. A. (2002). Detecção e Isolação de Falhas em Instrumentação de Processos de Produção de Petróleo. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Reis, L. L. G. (2008). Controle tolerante com reconfiguração estrutural acoplado a sistema de diagnóstico de falhas. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, Brasil;
- Riascos, L. A. M. (2002). Metodologia para detecção e tratamento de falhas em sistemas de manufatura através de rede petri. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Riascos, L. A. M., L. A. Moscato, & P.E. Miyagi, (2004). Detection and treatment of faults in manufacturing systems based on Petri Nets. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.*, Vol. 26, n° 3, pp 280-289;
- Ribeiro, R. L. D., C. B. Jacobina, E. R. C. da Silva & A. M. N. Lima, (2003a). Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems. *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 18, pp 587-593;
- Ribeiro, R. L. de A. (2003b). Sistema de Acionamento de Máquinas com Estratégia de Controle Tolerante a Falhas. Tese de Doutorado, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil;
- Ribeiro, R. L. D., C. B. Jacobina, E. R. C. da Silva & A. M. N. Lima, (2004a). Fault-tolerant voltage-fed PWM inverter AC motor drive systems. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 51, pp 439-446;

- Ribeiro, R. L. A., C. B. Jacobina; E. R. C. da Silva & A. N. Lima, (2004b). Sistemas De Acionamento De Máquinas Com Estratégias De Controle Tolerante A Falhas. *Eletrônica de Potência*, Vol. 9, nº 1, pp 45-52;
- Ribeiro Junior., A., O. Kastrup Filho, J. Amon Filho, P. C. Fernandez & A.P.A. da Silva, (1999). Especificação Automática e Acompanhamento do Desempenho Operativo de Disjuntores de Alta Tensão Utilizando Sistemas Especialistas. *Eletroevolução*, Vol. 16, nº16, pp 56-61;
- Ribeiro Neto, J. L. (2006). Detecção e Isolamento de Falhas em Motores de Indução Utilizando Técnicas de Inteligência Computacional. Dissertação de Mestrado, PUC-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Rivera, M. H. M. (2007). Diagnóstico de Falhas em Sistemas a Eventos Discretos : Uma Proposta de Aplicação em Processos de Separação Óleo-Gás. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Rocha, L. F. R. (2003). Diagnóstico De Falhas Através Da Análise De Vibrações Pelo Método De Sinais Residuais Na Manutenção Preditiva De Indústrias De Papel E Celulose. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Rocha Neto, E. (2004). Uma ferramenta robusta de tratamento de eventos em redes elétricas. Dissertação de Mestrado, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil;
- Rodrigues, M. A. P. (1999). Localização de Defeitos em Sistemas de Potência Utilizando Redes Neurais. Dissertação de Mestrado, UFF, Niteroi, RJ, Brasil;
- Rodrigues, M. C. (2007). Análise de integridade estrutural em hastes de bombeio por cavidades progressivas. Tese de Doutorado, UFPB, João Pessoa, PB, Brasil;
- Rossi, R. H. P. S. (2001). Utilização de redes neurais na monitoração da potência do reator IEAR1. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Sá, A. S. de (2006). Detectores de Defeitos para Sistemas de Controle de Tempo-Real Críticos. Dissertação de Mestrado, UFBA, Salvador, BA, Brasil;
- Sampaio, R. F. (2002). Sistema de Diagnóstico de Falhas para Subestações Baseado em Redes de Petri Coloridas. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza, CE, Brasil;
- Sampaio, R. F., G.C. Barroso, & R. P. S. Leão, (2005). Método de implementação de Sistema de Diagnóstico de Falta para subestações baseado em Redes de Petri. *Controle & Automação*, Vol. 16, nº 4, pp 417-426;

- Santiago, D. F. de A. (1999). Avaliação de Fontes de Perturbações Síncronas e Assíncronas na Obtenção das Respostas em Frequência de Sistemas Dinâmicos Rotativos. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, PB, Brasil;
- Santiago, D. F. de A. (2004). Diagnóstico de Falha em Máquinas Rotativas Utilizando Transformada de Wavelet e Redes Neurais Artificiais. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Santos, C. C. dos (1996). Diagnóstico e Caracterização do Estado Operacional de Sistemas Elétricos de Potência. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Santos, M. B. dos (1999). Uma Contribuição à Análise de Sinais Utilizando Wavelets. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, Brasil;
- Santos, E. R. de O. (2000). Utilização da Transformada Wavelet e Redes Neurais Artificiais Para o Reconhecimento de Padrões Aplicados à Manutenção Preditiva. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Santos, R. S. dos (2004). Caracterização do evento de queda de barras de controle através das temperaturas na posição dos termopares no núcleo de reatores PWR. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Santos, M. R. P. dos (2006). Estudo do método de resposta em frequência para localizar e quantificar vazamentos através do monitoramento de pressões e vazões em adutoras de água tratada. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Santos, D. F. dos (2007). Monitoramento e diagnóstico de defeitos em um grupo de bombas centrífugas com base em análise de vibração. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Santos, S. P. dos (2008). Aplicação de sistemas multiclassificadores no diagnóstico de falhas de motores de indução trifásicos. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, Brasil;
- Santos Filho, J. A. (2006). Utilização de redes neurais artificiais em classificação autônoma de peças metálicas empregando imagens radiográficas aplicáveis a sistemas IVA. Dissertação de Mestrado, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Santos Filho, F. G. (2007). Diagnóstico de Faltas em Sistemas Elétricos Baseado em Redes de Petri Coloridas e Técnicas de Sistemas Especialistas. Dissertação de Mestrado, Fortaleza, CE, Brasil;

- SciELO (2010). *Scientific Electronic Library Online (SciELO)*. Disponível em: [http://www.scielo.br/]. Acessado entre Janeiro e Fevereiro de 2010;
- Scucuglia, J. W. (2006). Sistema de controle de escoamento de gás natural em dutos de distribuição com detecção de vazamentos utilizando redes neurais. Tese de Doutorado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Silva, R. A. da (1996). Supervisão de tubulações por computador on-line. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Silva, A. A. (1999a). Detecção e Análise Dinâmica de Falhas em Rolamentos. Dissertação de Mestrado, USP, São Carlos, SP, Brasil;
- Silva, A. P. A. da, A. H. F. Insfran & G. Lambert-Torres, (1999b). Alarm processing based on associative neural memories with explanatory capability. *Engineering Intelligent Systems For Electrical Engineering and Communications*, Vol. 7, pp 109-115;
- Silva, D. G. da (2001). Diagnóstico de Falha em Redutores de Velocidade Submetidos a Variação de Potência. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Silva, R. A. da (2002). Detecção e diagnóstico de falhas em alto-forno - um estudo de caso. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Silva, H. V. da (2003). Utilização de Lógica Nebulosa na Detecção de Vazamentos em Dutos. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Silva, K. M. (2005a). Diagnóstico de Faltas em Linhas de Transmissão Baseado em Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet. Dissertação de Mestrado, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil;
- Silva, M. da, M. Oleskovicz & D. V. Coury, (2005b). Uma nova ferramenta baseada na transformada wavelet para localização digital de faltas. *Controle & Automação*, Vol. 16, n° 3, pp 345-358;
- Silva, V. G. da (2005c). Sobre Síntese de Observadores para Sistemas Descritores. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Silva, G. M. da (2006). Detecção de Falhas em Rotores Sustentados por Mancais Magnéticos Ativos. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Silva, K. M. e, B. A. de Souza, N. S. D. Brito, K. M. C. Dantas, F. B. Costa & S. S. B. da Silva, (2007a). Detecção e classificação de faltas a partir da análise de

- registros oscilográficos via redes neurais artificiais e transformada wavelet. *Controle & Automação*, Vol. 18, n° 2, pp 163-172;
- Silva, P. R. da (2007b). Desenvolvimento de um sistema para detecção de falhas de alta impedância em redes de distribuição. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Silva, D. R. C. (2008a). Sistema de Detecção e Isolamento de Falhas em Sistemas Dinâmicos Baseado em Identificação Paramétrica. Tese de Doutorado, UFRN, Natal, RN, Brasil;
- Silva, D. T. da (2008b). Sistema de apoio à decisão para identificação de falhas em redes de distribuição de energia elétrica utilizando redes neurais. Dissertação de Mestrado, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Silva, G. S. C. da (2008c). Aplicação A Um Reator De Hidrotratamento De Método De Detecção E Diagnóstico De Falhas Baseado Em Modelo. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Silva, J. G. B. da (2008d). Aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) no Diagnóstico de Defeitos em Rolamentos através da Assinatura Elétrica de Motores de Indução. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Silva Filho, R. I. da (2006). Um modelo para sistemas complexos diagnosticáveis com estudo de caso para diagnóstico em dispensadores automáticos de cédulas. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Silveira, P. M. da (2001). Identificação e Localização de Faltas Utilizando Análise por Decomposição Wavelet para Relés de Linhas de Transmissão. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Simões, R. C. (2002). Identificação de Falhas em Eixos de Rotores Flexíveis Utilizando Técnicas de Otimização. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, Brasil;
- Sirqueira, A. A. G. (2004). Controle H 'INFINITO' não linear de robôs manipuladores subatuados. Tese de Doutorado, USP, São Carlos, SP, Brasil;
- Sirqueira, A. A. G, M. H. Terra, & C. Buosi, (2007). Fault-tolerant robot manipulators based on output-feedback H-infinity controllers. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 55, pp 785-794;

- Sirqueira, A. A. G. & M. H. Terra, (2009). A Fault-Tolerant Manipulator Robot Based on H-2, H-infinity, and Mixed H-2/H-infinity Markovian Controls. *IEEE-ASME Transactions On Mechatronics*, Vol. 14, pp 257-263;
- Soares, A. K. (2007). Calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas hidráulicos no escoamento transitório. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Sotomayor, O. A. Z. & D. Odloak, (2005). Observer-based fault diagnosis in chemical plants. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 112, pp 93-108;
- Sotomayor, O. A. Z., D. Odloak & R. Giudici, (2007). Diagnosis of abnormal situations in a continuous solution polymerization reactor. *Macromolecular Theory and Simulations*, Vol. 16, pp 247-261;
- Sousa, E. O. de (2007). Detecção de Vazamentos em Tubulações Através de Método Acústico e da Análise de Transientes de Pressão. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Souza, S. R. de (1994). Análise convexa aplicada a sistemas dinâmicos contínuos. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Souza, J. C. S. , A.P.A. da Silva, & A.M.L. da Silva, (1996a). Aplicação de Redes Neurais para a Depuração de Dados na Supervisão em Tempo-Real de Sistemas de Potência. *Eletroevolução*, Vol. 7, pp 59-64;
- Souza, M. F. de (1996b). Desenvolvimento e Aplicação de um Método de Detecção e Identificação de Falhas Baseado em Observadores Dedicados. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Souza, A. L., S. L. Cruz & J. F. R. Pereira, (2000a). Leak detection in pipelines through spectral analysis of pressure signals. *Braz. J. Chem. Eng.*, Vol. 17, n° 4-7, pp 557-564;
- Souza, L. P. de (2000b). Detecção e diagnóstico de falhas utilizando adaptação paramétrica e modos deslizantes. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Souza, S. P. S. de (2000c). Estudo de técnicas não convencionais de processamento de sinais para diagnóstico de máquinas rotativas. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

- Souza, J. C. S. de, M. A. P. Rodrigues, M. T. Schilling & M. B. Do Coutto, (2001). Fault location in electrical power systems using intelligent systems techniques. *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 16, pp 59-67;
- Souza, A. L. (2002). Detecção de vazamentos em tubulações através da análise espectral de transientes de pressão. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Souza, J. C. S. de, E. M. Meza, M. T. Schilling & M. B. Do Coutto, (2004a). Alarm processing in electrical power systems through a neuro-fuzzy approach. *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 19, pp 537-544;
- Souza, J. N. M. de (2004b). Desenvolvimento de algoritmos para detecção, localização e quantificação de vazamentos em redes de dutos. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Souza, C. P. de (2005). Uma Arquitetura Autotestável para Circuitos Digitais Baseada no Algoritmo de Berlekamp- Massey e em Sistemas Imunológicos Artificiais. Tese de Doutorado, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil;
- Souza, L. M de (2006). Método para Detecção de Falhas em Transformadores de Distribuição de Poste com Proteção Operada. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil;
- Souza, T. B. P. de (2007). Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão para Localização de Faltas: Abordagem Via Transformada Wavelet. Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, PA, Brasil;
- Souza, A. H. T. de (2008a). Ferramentas Computacionais para Análise de Dutos com Defeitos de Corrosão. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife, PE, Brasil;
- Souza, C. C. de P. (2008b). Redes neurais artificiais aplicadas na detecção da queima no processo de retificação tangencial plana. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Souza, F. A. de (2008c). Detecção de Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Usando Dispositivos Programáveis. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil;
- Souza, S. M. de (2008d). Extração de Características para Localização de Defeitos em Linhas de Transmissão. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Star, R. R. (2006). Contribuições para a detecção de vazamentos em tubulações de gás natural: uma abordagem baseada em conhecimento. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;

- Szlichta, W. (1997). Sistemas de Apoio à tomada de decisão na recomposição de unidades geradoras após um desligamento por dispositivos de Proteção. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Talavera, R. M. R. (2002). Caracterização de Sistemas, Simulação e Otimização de Etapas da Planta de Processamento de Gás Natural. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Teixeira, E. B. de F. (1993). Diagnóstico inteligente de falhas em um processo de separação óleo-gás em plataformas offshore. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Teixeira, A. C. (2000). Detecção e diagnóstico de falhas em sistemas de processos químicos. Importância do conhecimento de estados intermediários de processos dinâmicos. Desenvolvimento de uma metodologia baseada em redes neurais. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Terra, M. H., & R. Tinós, (2001). Fault detection and isolation in robotic manipulators via neural networks: A comparison among three architectures for residual analysis. *Journal of Robotic Systems*, Vol. 18, pp 357-374;
- Tinós, R. (1999). Detecção e diagnóstico de falhas em robôs manipuladores via redes neurais artificiais. Dissertação de Mestrado, USP, São Carlos, SP, Brasil;
- Tinós, R. (2003). Tolerância a falhas em robôs manipuladores cooperativos. Tese de Doutorado, USP, São Carlos, SP, Brasil;
- Tinós, R., M. H. Terra, & M. Bergerman, (2007). A fault tolerance framework for cooperative robotic manipulators. *Control Engineering Practice*, Vol. 15, pp 615-625;
- Tinós, R. & M.H. Terra (2008). A fault detection and isolation system for cooperative manipulators. *Controle & Automação*, Vol. 19, nº 4, pp 406-416;
- Torres, A. L. O. (2006). Diagnóstico de Transformadores de Potência Através da Análise da Resposta em Frequência. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil;
- Tresmondi, A. (2003). Integração de Sistemas de Controle, Otimização e Monitoramento Multivariável em Processos Industriais Contínuos. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;

- Vargas, R. T. (1996). Um estudo experimental sobre detecção e diagnóstico de falha em rolamentos por medição e análise sinais acústicos e vibratórios. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Vaz Junior, C. A. (2006). Detecção, localização e quantificação de vazamentos: uma abordagem em séries temporais. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Veloso, R. C. (1999). Uma Contribuição para o Monitoramento de Motores de Combustão Interna Através da Análise de Sinais de Pressão Sonora e Vibração. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, Brasil;
- Venkatasubramanian, V., R. Rengaswamy, K. Yinc & S. N. Kavuri (2003). A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp 293-311;
- Vicente, S. A. da S. (2005). Otimização de um sistema híbrido de diagnóstico de falhas em equipamentos mecânicos utilizando redes neurais probabilísticas e algoritmo genético. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- Victor, V. F. (2005). Sistema Especialista para Detecção de Falhas em Comandos Elétricos. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, Brasil;
- Vieira, J. B. L. (1994). Métodos computacionais para projeto de controladores robustos. Falhas em sistemas multivariáveis. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;
- Vieira, L. de A. (1996). Detecção e acomodação de falhas em sistemas elétricos usando redes neurais artificiais. Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, PA, Brasil;
- Vieira, H. C. P. (2003). Desenvolvimento de sistema em tempo real e com tolerância a falhas para controle de combustão de óleo combustível e gás natural em caldeiras para geração de vapor de água. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza, CE, Brasil;
- Villela, R. A. (1998). Prognósticos de Defeitos em Sistemas Mecânicos baseados na Análise de Vibrações. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil;
- Wada, M. (1996). Acomodação de falhas utilizando técnica GLR. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil;

- Wanderley, M. H. A. (2004). Processamento de Alarmes Subestações de Energia Elétrica utilizando sistemas Inteligentes. Dissertação de Mestrado, UFF, Niteroi, RJ, Brasil;
- Werneck, M. P. (2002). Um Sistema Baseado em Conhecimento para Diagnóstico, Solução e Aprendizado de Falhas em Controladores Lógicos Programáveis. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil;
- Willsky, A. S. (1976). Survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatica*, Vol. 12, pp 601-611;
- Wolvovich, M. J. (1993). Reconfiguração de lei de controle para sistemas tolerantes a falhas. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil;
- WS (2010). *Web of Science (WS)*. Disponível em: [<http://www.isiknowledge.com>]. Acessado entre Janeiro e Fevereiro de 2010;
- Yamamoto, M. M. F. (2001). Detecção de falhas em processos baseada em estimulação de parâmetros. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CHAPTER IV

Chapter IV. System studied: natural gas, the recovery unit of natural gas and sales gas compression system

RESUMO

This chapter presents the environmental and economic importance of natural gas, describing its position in the Brazilian economy. Also the main stages of the natural gas production chain are briefly described. A more detailed presentation of the processing stage is carried out, and the process used in the recovery unit natural gas which is the object of study of this thesis is also described. Important pieces of information regarding the sales gas compression stage of this process are presented, since the thesis focuses on the faults of this process step.

PALAVRAS-CHAVE

natural gas; recovery unit of natural gas; sales gas compression system

CAPÍTULO IV

Capítulo IV. O gás natural, a unidade de recuperação de gás natural e o sistema de compressão do gás de venda

RESUMO

Este capítulo mostra a importância ambiental e econômica do gás natural, descrevendo a sua situação no mercado brasileiro. As principais fases da cadeia produtiva do gás natural também são brevemente descritas. É feita uma apresentação mais detalhada da fase de processamento e do processo utilizado na unidade de recuperação de gás natural que é objeto de estudo da tese. Informações importantes a respeito da etapa de compressão do gás de venda deste processo são apresentadas, já que a tese tem como foco as falhas desta etapa do processo.

PALAVRAS-CHAVE

gás natural; unidade de recuperação de gás natural; sistema de compressão do gás de venda

IV.1. O GÁS NATURAL

Apesar dos custos e dos problemas ambientais, os combustíveis fósseis ainda representam cerca de 85% da energia primária consumida no mundo, sendo que a participação do gás natural é de 23% (Vieira *et al.*, 2005). Estes autores defendem também a idéia de que se a sociedade ainda não pode prescindir do uso dos combustíveis fósseis, pode fazer escolhas entre estes combustíveis, de forma a minimizar os problemas ambientais. Neste ponto de vista, o combustível a ser escolhido seria o gás natural, já que a sua utilização gera menos emissão de CO₂ e de materiais particulados do que os outros combustíveis fósseis:

“O gás natural é o combustível capaz de realizar a transição, até que surja uma nova tecnologia energética de menor impacto ambiental, que possa substituir, em larga escala e de forma econômica, os combustíveis fósseis.”

Vieira et al. (2005)

A demanda por gás natural tem apresentado uma tendência crescente. O Brasil passou de um consumo de 4 bilhões de m³ em 1990 para um consumo de 8 bilhões de m³ em 1999, implicando em um crescimento anual acumulado de 7%. A partir da interconexão com a Bolívia o consumo anual cresceu 25% até chegar aos 15 bilhões de m³ consumidos em 2002 (ANP, 2004).

Analisando o período compreendido entre os anos de 1964 e 2006, as reservas provadas de gás natural cresceram a uma taxa média de 7% ao ano e em 2006 as reservas provadas ficaram em torno de 350 bilhões de m³. Este crescimento está relacionado principalmente às descobertas decorrentes do esforço contínuo do país para diminuir o grau de dependência do petróleo (ANP, 2007).

Ainda no período de 1964 a 2006, a produção de gás natural cresceu 11% ao ano, em média, e atualmente a capacidade nominal de processamento totaliza 53 milhões m³/d. Na Bahia, o fornecimento de gás natural é realizado pelas unidades de processamento da Petrobras, chamadas internamente pela companhia de Candeias, Catu 1 e Catu 3 (que também é chamada de Catu II). A capacidade instalada de

processamento destas unidades juntas totaliza 6 milhões m³/d, o que representa 11% da capacidade brasileira (ANP, 2007).

IEA (2006) prevê uma projeção da produção de gás para 23 bilhões de m³ em 2015 e para 38 bilhões de m³ em 2030, com uma taxa de crescimento projetada de 5% ao ano no cenário de referência do estudo realizado para o período em questão.

Em decorrência da expectativa de incremento do mercado de gás natural no país, novos investimentos estão previstos para o setor de gás natural. Segundo ANP (2007), os planos atuais incluem a implantação de três novas unidades de processamento, as quais permitirão uma expansão de cerca de 13 milhões de m³/d na capacidade de processamento atual, e a realização de diversos projetos para a expansão da infraestrutura de transporte do gás no país.

A cadeia produtiva de gás natural é um conjunto de atividades sequenciais que funcionam de forma integrada, podendo ser divididas em etapas ou fases distintas. Dentre outras, estas fases são compostas por exploração, perfuração, produção, condicionamento, transferência, processamento, transporte, armazenamento e distribuição.

A Figura IV.1 mostra algumas fases da cadeia produtiva do gás natural. A exploração é a etapa inicial do processo e consiste no reconhecimento e estudo das estruturas propícias ao acúmulo de petróleo ou gás natural, tendo como objetivo a descoberta dos reservatórios (Vaz *et al.*, 2008). Para confirmar a existência do reservatório é feita a perfuração de poços exploratórios e, havendo viabilidade econômica, mais poços são perfurados (fase de perfuração). Depois dos poços perfurados, inicia-se a fase de produção do campo produtor, onde o gás natural é extraído do reservatório. A fase do condicionamento consiste em um tratamento primário do gás produzido, ainda no campo de produção, para que este seja transferido para as unidades de processamento em condições seguras. Na fase do processamento o gás natural é beneficiado e separado em produtos especificados e adequados para a comercialização. O gás especificado para consumo é então transportado às companhias distribuidoras estaduais (fase de transporte), podendo ou não ter sido anteriormente armazenado, e então é comercializado e entregue ao consumidor final por essas companhias (fase de distribuição).

As fases de condicionamento e processamento são equivalentes no que se refere às operações unitárias que ocorrem em um sistema de produção e processamento de gás natural (Vaz *et al.*, 2008). Estas duas fases têm como objetivo garantir uma especificação do gás. Entretanto, cada fase garante uma especificação diferente, de acordo com as diferentes finalidades. A principal diferença entre estas fases é que o condicionamento se refere a garantir a qualidade do gás para transferência e/ou para usos internos e o processamento se refere ao atendimento à legislação em vigor que estabelece os requisitos da qualidade do gás para a comercialização (ANP, 2010b).

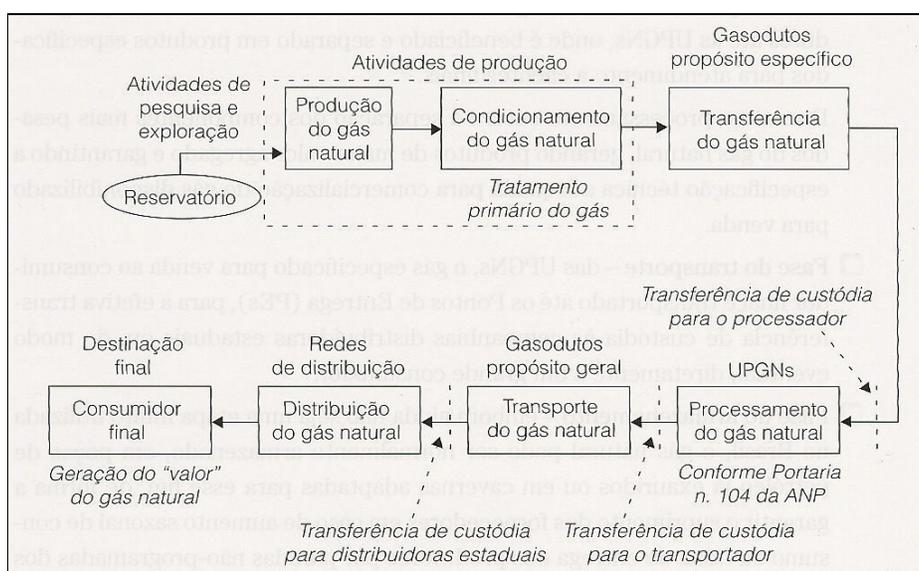


Figura IV.1. Cadeia produtiva do gás natural (Vaz *et al.*, 2008).

IV.2. A UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE GÁS NATURAL

O processamento de gás natural é realizado através de uma instalação industrial denominada Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), que visa a recuperação das frações pesadas na forma líquida, a partir do gás natural úmido ou rico, e à especificação do gás natural processado para comercialização (ANP, 2010a). O gás processado também é chamado de gás combustível, gás seco, gás pobre, gás residual, gás especificado ou gás de venda (Vaz *et al.*, 2008). Neste trabalho será utilizado prioritariamente o termo gás de venda (*sales gas*). Este gás é composto basicamente por metano (C1) e etano (C2) e é utilizado por indústrias, automóveis, residências, estabelecimentos comerciais e usinas de geração de energia (Máximo Filho, 2005). A

corrente líquida recuperada, normalmente formada pelo propano (C3) e por hidrocarbonetos mais pesados, é conhecida como LGN (Líquido de Gás Natural). Estas correntes líquidas possuem um maior valor energético e, conseqüentemente, um maior valor econômico do que o gás natural processado (Máximo Filho, 2005). Os hidrocarbonetos recuperados podem ser estabilizados e separados por fracionamento, para obtenção dos produtos desejados, na própria UPGN ou em outras unidades específicas, tais como as Unidades de Fracionamento de Líquidos (UFL) e as Unidades de Processamento de Condensado de Gás Natural (UPCGN) (ANP, 2010b).

Existem muitas configurações possíveis para uma UPGN, conforme mostrado na Figura IV.2. A alternativa mais simples (alternativa A) consiste em produzir apenas LGN, para posterior tratamento, sendo que neste caso a unidade de processamento também é chamada de Unidade de Recuperação de Gás Natural (URGN). Em outras unidades (alternativa B) o processamento inclui o fracionamento do LGN para se obter o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), popularmente conhecido como gás de cozinha, e a nafta leve (C5+), também chamada de gasolina natural. ANP (2010a) utiliza apenas esta configuração na definição de UPGN. Em outras unidades se consegue incorporar parte do etano ao GLP (alternativa C), em teores que não alterem a especificação para este derivado. Em unidades mais complexas pode-se separar uma corrente de LGN composta de frações mais pesadas do que o etano (alternativa D), para posterior obtenção de etano líquido. Nesse caso, recupera-se, também, uma fração de gás de venda, predominante composto de metano. Essa UPGN recebe o nome de Unidade de Recuperação de Líquidos (URL).

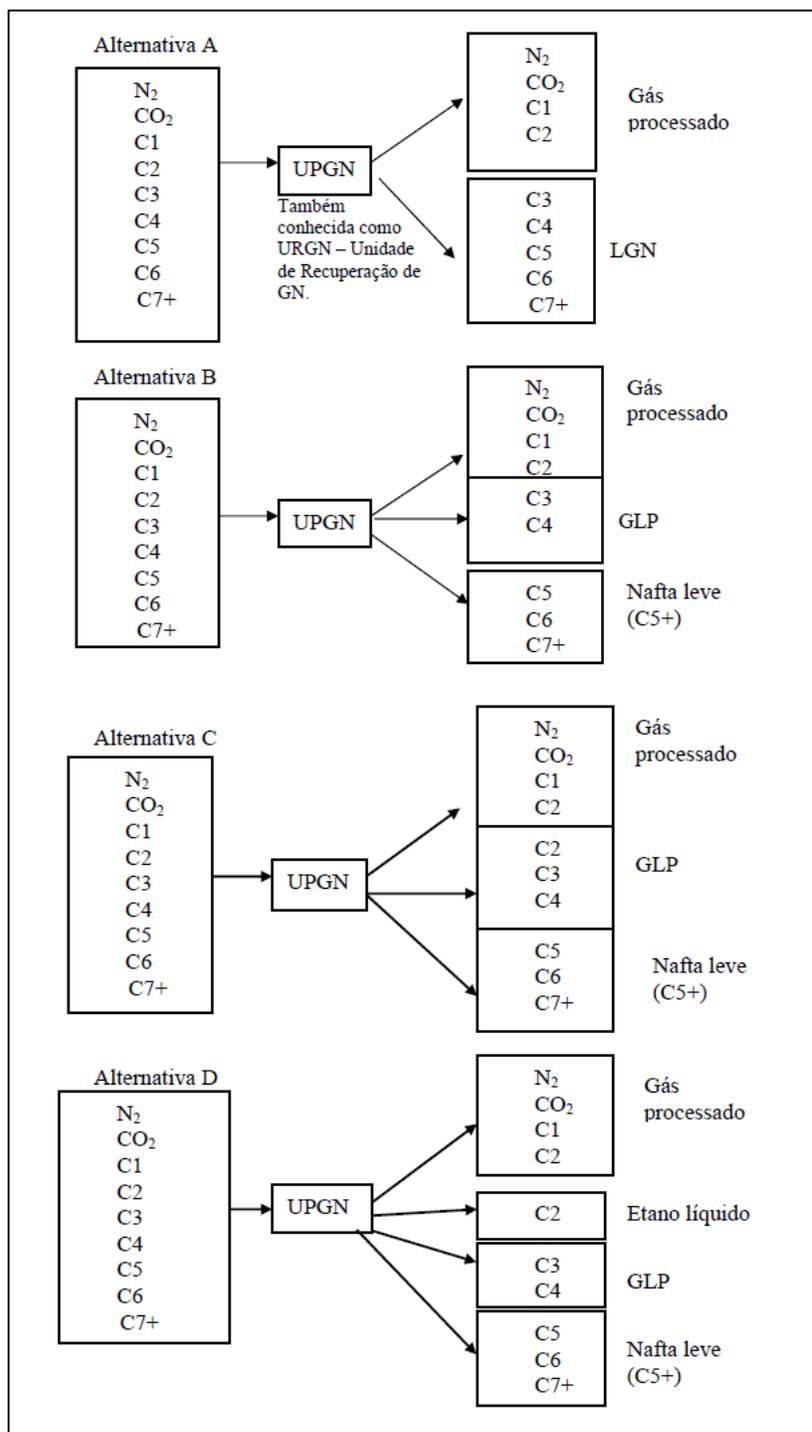


Figura IV.2. Produtos de uma UPGN (Máximo Filho, 2005).

O sistema mais importante das UPGNs é a liquefação dos componentes mais pesados ou controle de *dew-point* (ponto de orvalho) do gás natural e o processo

termodinâmico escolhido para este fim define o tipo de unidade industrial (Vaz *et al.*, 2008). Os principais processos aplicáveis a uma UPGN são (Vaz *et al.*, 2008): refrigeração simples, absorção refrigerada, expansão Joule-Thompson (JT) e Turbo-Expansão (TE). Encontra-se também a utilização de mais de um dos processos anteriormente citados de forma combinada.

No processo de absorção refrigerada o óleo de absorção é o agente fundamental na recuperação dos hidrocarbonetos líquidos. Este processo utiliza a refrigeração apenas como uma etapa auxiliar para obter maiores recuperações. Os demais processos citados têm em comum o princípio básico de promover a condensação dos hidrocarbonetos mais pesados por redução de temperatura. Quanto aos dois processos de expansão, JT e TE, ambos causam resfriamento do gás devido à redução de pressão (*flash* adiabático), chamado de efeito Joule-Thomson. A diferença básica entre eles, em termos termodinâmicos, é que o primeiro é isentálpico (não há geração de trabalho) e o segundo é isoentrópico (há geração de trabalho) (Máximo Filho, 2005).

Conforme descrito no Capítulo I, esta tese tratará das falhas de uma Unidade de Recuperação de Gás Natural da Petrobras, localizada no município de Pojuca na Bahia, a URGN-3-Bahia, também chamada de Catu II (Vaz *et al.*, 2008) ou de Catu 3 (Máximo Filho, 2005). A URGN-3-Bahia começou a operar em 2005, possui uma produção de LGN de 600 m³ e uma capacidade de processamento de 2,75 milhões de m³ por dia (Máximo Filho, 2005), utilizando o processo de turbo-expansão. O processo de turbo expansão é o processo termodinâmico mais eficiente dentre os atualmente utilizados, por gerar temperaturas mais baixas do que os demais (Vaz *et al.*, 2008). É normalmente adotado quando se deseja recuperar etano juntamente com os componentes mais pesados (Máximo Filho, 2005), apesar da unidade aqui tratada liberar o etano juntamente com o metano no gás de venda.

De forma geral, as principais etapas de processo encontradas na URGN-3-BA são: separação de entrada, compressão inicial, filtração, desidratação, regeneração, resfriamento, expansão, desetanização e compressão do gás de venda. A descrição básica do processo que é feita a seguir está baseada no descritivo de processo da unidade (Petrobrás, 2003), em Máximo Filho (2005) e em Vaz *et al.* (2008). Na separação de entrada, o gás natural rico que entra na unidade é separado da fase líquida (condensado de gás natural) e da água livre. Na etapa de compressão inicial, a pressão

do gás é elevada, com o objetivo de obter a pressão necessária para a etapa de expansão, propiciando maiores recuperações de LGN na torre desetanizadora e menor exigência na compressão do gás de venda. Na filtração são removidas as partículas sólidas presentes no gás, além de gotas de líquido. A etapa de desidratação é realizada por meio da utilização de um sistema de peneiras moleculares e é necessária para prevenir o congelamento da água e a formação de hidratos após a passagem pelos equipamentos que operam a baixa temperatura. Os leitos das peneiras moleculares são regenerados com o gás de regeneração quente e seco (etapa de regeneração). O gás de regeneração úmido é direcionado novamente para a etapa de filtração. No resfriamento, o gás desidratado proveniente das peneiras moleculares é resfriado e o hidrocarboneto líquido condensado é separado antes do gás ir para a etapa de expansão. No turbo-expansor o gás sofre uma expansão isentrópica com geração de trabalho. A energia liberada na expansão do gás natural é utilizada para acionar o compressor inicial da unidade. Devido à redução de temperatura, resultante da remoção de energia e da redução de pressão, as frações mais pesadas são condensadas, gerando uma corrente bifásica. Estas frações condensadas são recuperadas na forma de LGN na etapa de desetanização. Nesta mesma etapa é obtido o gás natural que é encaminhado à etapa de compressão para elevar a sua pressão, antes de ser enviado para venda. O LGN, por sua vez, é enviado para a Refinaria Landulpho Alves da Petrobras (RLAM), onde é feito o fracionamento, gerando produtos de maior valor agregado.

IV.3. O SISTEMA DE COMPRESSÃO DO GÁS DE VENDA

Nesta seção o sistema de compressão do gás de venda será um pouco mais detalhado com base no descritivo do processo da unidade (Petrobrás, 2003) e em Vaz *et al.* (2008), já que a tese tem como foco as falhas desta etapa do processo.

O objetivo do sistema de compressão é fornecer ao gás que sai da desetanizadora uma pressão adequada ao seu transporte, comercialização e uso. Os compressores alternativos e centrífugos são os mais frequentemente aplicados aos processos industriais de gases. O sistema de compressão de gás de venda em estudo é composto por dois compressores alternativos, sendo que os dois revezam o estado de funcionamento (apenas um deles fica em operação a cada vez). De forma geral, o compressor alternativo utiliza um sistema mecânico conhecido como biela-manivela

para converter o movimento rotativo de um eixo no movimento translacional de um pistão ou êmbolo, conforme é mostrado na Figura IV.3. A cada rotação do acionador, o pistão efetua um curso de ida e outro de retorno em relação ao fundo do cilindro. O ciclo de funcionamento deste tipo de compressor é composto pelas etapas de admissão, compressão, descarga e expansão. O funcionamento de um compressor alternativo está fortemente ligado ao comportamento das válvulas. A forma de atuação das válvulas é função das pressões interna e externa do cilindro e configura cada etapa do ciclo de funcionamento do compressor.

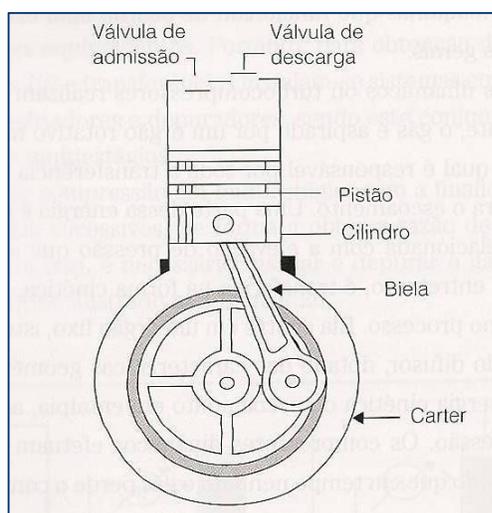


Figura IV.3. Compressor de cilindro e pistão (Máximo Filho, 2005).

Os compressores alternativos do sistema em estudo são de simples estágio, com 6" de curso de pistão, 6 bielas e potência de 3600 kW, sendo acionado diretamente pelo eixo do motor elétrico. Cada válvula de sucção possui duas válvulas *unloaders* (descarregadoras), que por sua vez são atuadas por válvulas solenóides e utilizam ar para acionamento. Qualquer número de cilindros pode ser descarregado durante a operação do compressor e a capacidade de vazão depende deste número. Para a capacidade máxima de vazão requerida na unidade (100%) somente 5 bielas são utilizadas. No estado descarregado (nenhum cilindro em carga), a capacidade de vazão fica reduzida a aproximadamente 50%.

O gás que sai pelo topo da torre desetanizadora é aquecido em um trocador de calor antes de entrar no sistema de compressão do gás de venda. No sistema de

compressão, o gás passa inicialmente por um vaso de sucção para remoção de líquidos, evitando a entrada destes nos compressores. O gás entra então no compressor pelos balões de sucção. Existem dois balões de sucção por compressor. Um balão de sucção é usado para os cilindros 1, 3 e 5, enquanto o segundo balão de sucção é usado para os cilindros 4 e 6. Os balões de sucção possuem estrutura interna necessária para diminuir a energia cinética do gás de alimentação dos cilindros e minimizar a vibração e o ruído. Depois de comprimido, o gás deixa o compressor através dos balões de descarga. Também existem dois balões de descarga por compressor, que são utilizados da mesma forma que os balões de sucção (um para os cilindros ímpares e o outro para os pares) e com objetivo semelhante. O gás que sai do compressor deve ser resfriado antes de seguir para o gasoduto de venda, já que foi aquecido durante o processo de compressão. Depois de ser resfriado à temperatura de trabalho do duto nos resfriadores, o gás passa por outro vaso de sucção para remover qualquer líquido residual que porventura ainda esteja presente. A quantidade de gás é medida na saída deste vaso de sucção, antes de deixar a unidade como gás industrial para venda.

O bom andamento da operação da unidade industrial descrita está baseado na existência de sistemas de controle e de proteção. Os sistemas de proteção fazem com que alarmes de advertência sejam acionados e/ou a operação da planta seja automaticamente interrompida (intertravamento) para limites de segurança estabelecidos. Limites de segurança estão estabelecidos para variáveis como temperatura, pressão, vazão e vibração. Tendo em vista que grande parte das falhas que causam a parada da planta são oriundas do sistema de proteção, este sistema pode ser considerado como determinante na detecção destas falhas. A operação do sistema de compressão do gás de venda, assim como dos outros sistemas da unidade, depende também do funcionamento dos seus sistemas auxiliares, que podem ser considerados como subsistemas do sistema principal. Os principais sistemas auxiliares da etapa de compressão do gás de venda são: sistema de óleo lubrificante e utilidade; sistema de lubrificação dos motores; e sistema de pressurização do motor / sistema de purga.

LISTA DE ABREVIATURAS

GLP : Gás liquefeito de Petróleo;
JT : Joule-Thompson;

LGN	: Líquido de Gás Natural;
RLAM	: Refinaria Landulpho Alves;
TE	: Turbo Expansão;
UFL	: Unidade de Fracionamento de Líquidos;
UPCGN	: Unidade de Processamento de Condensado de Gás Natural;
UPGN	: Unidade de Processamento de Gás Natural;
URGN	: Unidade de Recuperação de Gás Natural;
URL	: Unidade de Recuperação de Líquidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANP (2004). A Indústria de Gás Natural no Brasil, Relatório do Estudo para Elaboração de um Modelo de Desenvolvimento da Indústria Brasileira de Gás Natural. *Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, ANP*. Disponível em: [http://www.anp.gov.br/gas/gas_projetos.asp]. Acessado em Novembro de 2007;
- ANP (2007). Boletim Mensal do Gás Natural - Junho 2007. *Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, ANP*. Disponível em: [http://www.anp.gov.br/doc/gas/2007/boletimgas_200707.pdf]. Acessado em Novembro de 2007;
- ANP (2010a). Glossário. *Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, ANP*. Disponível em: [<http://www.anp.gov.br>]. Acessado em Março de 2010;
- ANP (2010b). Refino e Processamento de Gás Natural – Apresentação. *Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, ANP*. Disponível em: [<http://www.anp.gov.br>]. Acessado em Março de 2010;
- IEA (2006). World Energy Outlook 2006, Chapter 16, Focus on Brazil. *International Energy Agency, IEA*. Disponível em: [<http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2006/Brazil.pdf>]. Acessado em Novembro de 2007;
- Máximo Filho, D. H. (2005). Introdução ao Processamento e Tratamento do Gás Natural. Apostila, *Petrobrás*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

Petrobrás (2003). Descritivo do processo e árvore do manual da URGN-3-BA. Manual, *Petrobrás*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

Vaz, C. E. M., Maia, J. L. P., Santos, W. G. dos (2008). Tecnologia da Indústria do Gás Natural. 1a. ed., *Blucher*, São Paulo, Brasil;

Vieira, P. L., Garcia, C. B., Guimarães, H. B., Torres, E. A., Pereira, O. L. S. (2005). Gás natural: benefícios ambientais no Estado da Bahia. 1ª. ed., *Solisluna*, Salvador, Brasil.

CHAPTER V

Chapter V. Partial conclusions

ABSTRACT

In this chapter some final comments are made, presenting an overview of the thesis proposal and the work already done. The future tasks to be held in order to accomplish the proposed objectives are also presented.

KEYWORDS

fault detection, diagnosis and correction; conclusions; future tasks

CAPÍTULO V

Capítulo V. Conclusões parciais

RESUMO

Neste capítulo são feitos alguns comentários finais, fornecendo uma visão geral do trabalho já realizado e da proposta da tese. São também apresentadas as atividades futuras que serão realizadas para que se consiga atingir os objetivos propostos.

PALAVRAS-CHAVE

detecção, diagnóstico e correção de falhas; conclusões; atividades futuras

V.1. CONCLUSÕES PARCIAIS

O texto que foi apresentado é parte integrante de um exame de qualificação ao doutorado. A tese de doutorado que está sendo elaborada tem como objetivo desenvolver um sistema de detecção, diagnóstico e correção de falhas aplicado a um processo industrial, na área de pesquisa denominada de gerenciamento de eventos anormais (*Abnormal Event Management, AEM*) ou ainda de detecção, diagnóstico (isolamento e análise) e correção de falhas - *Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction, FDIAC*. No desenvolvimento desta pesquisa, foi feita uma análise crítica da bibliografia da área aplicada a processos industriais, de uma forma ampla. A utilização de FDIAC em processos industriais começou a surgir na década de 70, sendo que o desenvolvimento desta área em nível internacional é marcado pelo significativo número de publicações, que ainda está em crescimento, e pelo envolvimento de importantes centros de pesquisa.

Apesar do desenvolvimento da área, ainda existem importantes lacunas que não foram preenchidas. Os Capítulos II e III foram elaborados com o objetivo de sanar algumas dessas necessidades para contribuir com o desenvolvimento científico da área como um todo. Estes capítulos tratam de textos anteriores àqueles que abordarão o desenvolvimento da técnica que será aplicada e do sistema de FDIAC em si, e constarão no documento final da tese.

O Capítulo II tem o objetivo de resolver o problema das inconsistências das terminologias e definições utilizadas, nacional e internacionalmente. Foram apresentadas e discutidas as versões de diferentes autores para, então, ser formulada uma proposta consistente dos termos e definições da área no âmbito dos processos industriais. Este capítulo também aponta os principais sistemas industriais investigados nos últimos anos para a resolução de problemas de FDIAC. Os diversos tipos de sistemas industriais encontrados demonstram a necessidade de sintonia com outras áreas correlatas. O Capítulo II analisa ainda quais são as técnicas mais aplicadas na resolução dos problemas encontrados. O resultado desta análise é a base da escolha das técnicas de inteligência artificial que serão utilizadas para o desenvolvimento do sistema de FDIAC que será feito o posteriormente: redes neuronais e técnicas híbridas, utilizando algoritmo genético.

No Capítulo III foi apresentado um panorama das pesquisas em FDIAC no Brasil e no mundo. A origem, a evolução e a situação atual da área de FDIAC de processos industriais foram tratadas de forma qualitativa e quantitativa, resultando em conclusões relevantes. Entre outras constatações, o panorama das pesquisas mostrou a importância da área para o Brasil, que está refletida no elevado número de teses e dissertações. No entanto, a contribuição científica brasileira ainda é incipiente para a área de FDIAC do ponto de vista internacional. Desta forma, um direcionamento deve ser feito no sentido de converter o conhecimento dos trabalhos nacionais em publicações, principalmente as internacionais.

O processamento de gás natural foi o processo industrial escolhido para aplicação do sistema de FDIAC a ser desenvolvido. O forte apelo ambiental e econômico que esta escolha possui foi detalhado no Capítulo IV. Este capítulo apresentou também informações básicas e fundamentais a respeito do gás natural, da unidade de recuperação de gás natural (URGN) da Petrobras que será objeto de estudo da tese e do sistema de compressão do gás de venda, já que a tese tem como foco as falhas desta etapa do processo.

V.2. ATIVIDADES FUTURAS

Para alcançar os objetivos propostos, os capítulos do presente documento serão complementados e outros serão inseridos antes da conclusão da tese.

Uma metodologia de desenvolvimento de sistemas de FDIAC acoplados a estudos prévios de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (*Reliability, Availability and Maintainability*, RAM) está sendo desenvolvida e será posteriormente aplicada. A descrição desta metodologia será parte da complementação do Capítulo I.

A proposta das terminologias e definições para FDIAC de processos industriais será ampliada e aprimorada. Esta ampliação será feita a partir de diferentes visões das áreas de Eletromecânica, Ciência da Computação e Engenharia de Processo. Desta forma, será aprimorada a sintonia dos termos e definições das áreas correlatas.

Um dos novos capítulos tratará de realizar os estudos prévios de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade de uma URGN. Este capítulo avaliará a possibilidade de aplicação de uma nova classe de distribuições de vida: as q -distribuições. Para o desenvolvimento deste capítulo, que já está em andamento, foi necessário fazer a

formulação matemática das q -distribuições utilizadas. Esta formulação encontra-se no Apêndice A deste trabalho.

Outro capítulo tratará do desenvolvimento do sistema de FDIAC da etapa de compressão do gás de venda de uma URGN utilizando redes neurais. Neste capítulo será apresentado um embasamento maior da escolha das redes neurais como técnica eleita. Também será feita a aplicação da metodologia completa de desenvolvimento de sistemas de FDIAC acoplados a estudos prévios de RAM.

Depois, em um novo capítulo, outra técnica de inteligência artificial será utilizada para aprimorar o sistema de FDIAC desenvolvido. Possivelmente um híbrido com algoritmo genético será desenvolvido. Será feita também a comparação dos resultados com os do capítulo anterior.

O detalhamento das atividades futuras está apresentado no cronograma de acompanhamento destas atividades (Anexo I) e a relação de publicações foi inserida no Anexo II.

LISTA DE ABREVIATURAS

AEM	: <i>Abnormal Event Management</i> (gerenciamento de eventos anormais);
FDIAC	: <i>Fault Detection, diagnosis (Isolation and Analysis) and Correction</i> (detecção, diagnóstico (isolamento e análise) e correção de falhas);
RAM	: Reliability, Availability and Maintainability (confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade);
URGN	: Unidade de Recuperação de Gás Natural.

Anos		2008	2009	2010												2011				Apresentação ao PEI	
Meses		3-12	1-12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4-12		
Capítulos da tese	Atividade	No. do artigo*																			
compressão do gás de venda) e comparação com as técnicas de AI do capítulo anterior.	Exogénia - Elaborar uma nova técnica (talvez um híbrido de redes neuronais e algoritmos genéticos). Comparar o desempenho com a anteriormente aplicada.	-											P								
VIII. Conclusões e sugestões	-	-											P								
Apêndice A. Detecção, diagnóstico e correção de falhas em processos industriais: Um panorama das pesquisas no Brasil e no mundo	Fazer a revisão bibliográfica sobre FDIAC de processos industriais. A depender do conteúdo do capítulo II.3 esta parte vira um apêndice.	2	R	R	R																
Apêndice B. A new class of life distributions based on Tsallis statistics in reliability engineering.	Em elaboração.	5	R						P												
-	Correções dos orientadores e finalização.	-												P							
-	Qualificação, pré-defesa e defesa.	-													P						

(*) Ver lista de publicações no Anexo II.

R – Realizado.

P – Previsto.

ANEXO II

Anexo II. Lista de publicações

No. do artigo	Título	Meio de publicação	Qualis ou fator de impacto	Status	Parte da Tese
1	Deteção, diagnóstico e correção de falhas em processos industriais: I. Uma proposição consistente de definições e terminologias	Revista: Controle & Automação	B2 nas engenharias III e B1 nas engenharias IV (aproveitamento de 8 créditos)	Submetido à revista	Capítulo II.1. Deteção e Diagnóstico de Falhas em Processos Industriais: Conceitos, Definições e Terminologias Básicas
2	Deteção, diagnóstico e correção de falhas em processos industriais: II. Um panorama das pesquisas no Brasil e no mundo	Revista: Controle & Automação	B2 nas engenharias III e B1 nas engenharias IV (aproveitamento de 8 créditos)	Submetido à revista	Capítulo II.2. Deteção e Diagnóstico de Falhas em Processos Industriais: Um Panorama das Pesquisas no Brasil e no Mundo
3	Reliability modeling of a natural gas recovery plant using q -Weibull distribution	Congresso internacional: PSE 2009 e Revista: Computer-Aided Chemical Engineering	B4 nas engenharias II	Publicado	Lista de publicações
4	The reliability and availability of a natural gas industrial processing using a new class of life distributions	Revista: Journal of Petroleum Science Engineering	0.824 (JCR-2008) e A1 nas engenharias III (aproveitamento de 11 créditos)	Em elaboração	Capítulo IV. Confiabilidade e disponibilidade de uma indústria de processamento de gás natural avaliando a aplicação de uma nova classe de distribuições de vida
5	A new class of life distributions based on Tsallis statistics in reliability engineering	Revista: Reliability Engineering and System Safety	1.379 (JCR-2008), A2 nas engenharias III e A1 nas engenharias I (aproveitamento de 11 créditos)	Em elaboração	Apêndice A. A new class of life distributions based on Tsallis statistics in reliability engineering

APÊNDICE A

Apêndice A. Uma nova classe de distribuições de vida baseadas na estatística de Tsallis para engenharia de confiabilidade

RESUMO

Modelagem da confiabilidade é um dos passos mais importantes para avaliação da confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (*Reliability, Availability and Maintainability*, RAM). Existem várias distribuições estatísticas que podem ser usadas para modelar dados de vida. No entanto, para alguns sistemas, as distribuições de vida clássicas não são satisfatórias. Distribuições estatísticas generalizadas desenvolvidas recentemente pela mecânica estatística não-extensiva são conhecidas como q -distribuições. Essas distribuições generalizadas têm sido aplicadas com êxito em vários ramos. O foco principal deste trabalho é apresentar as q -distribuições que podem melhorar a modelagem de problemas de engenharia de confiabilidade. Todas as funções para análise de dados de vida foram deduzidas usando as novas distribuições q -Weibull, q -exponencial e q -lognormal.

PALAVRAS-CHAVE

confiabilidade; modelagem; q -distribuições

APPENDIX A

Appendix A. A new class of life distributions based on Tsallis statistics in reliability engineering

ABSTRACT

Reliability modeling is one of the most important steps for Reliability, Availability and Maintainability (RAM) assessment. There are many different statistical distributions that can be used to model life data. However, for some systems the classical life distributions are not satisfactory. Generalized statistical distributions recently developed using nonextensive statistical mechanics are known as q -type distributions. These generalized distributions have been successfully applied in several science and engineering fields. The main focus of the present work is to present the q -type distributions that can improve modeling reliability engineering problems. All functions for analysis of life data were derived using the new q -Weibull, q -exponential and q -lognormal distributions.

KEYWORDS

reliability; modeling; q -type distributions

A.1. INTRODUCTION

A growing focus has been placed on Reliability, Availability and Maintainability (RAM) during the design and operation of industrial systems, mainly due to the size and complexity of modern industrial plants. A comprehensive assessment of operational safety requires a systemic approach based on statistical models for description of failure rates related to the equipments and their components. Development, choice or even application of a model to accurately characterize the failure rate is a non trivial task and mathematical simulation of reliability performance depends crucially on it. However, life data are still scarce and a predictive capability of the model should be often investigated. In order to overcome these problems, it is necessary to have confidence in the model. So, reliability modeling becomes one of the most important steps for RAM assessment.

There are many different statistical distributions that can be used to model life data. However, for some systems the classical life distributions are not satisfactory.

Along the last two decades there has been a continuous and increasing development on what has been known as nonextensive statistical mechanics. The 1988 seminal paper by Tsallis (1988) has introduced a generalization of the concept of entropy, by means of a parameter q :

$$S_q = k \frac{\sum_i^W p_i^q - 1}{1 - q}, \quad (\text{A.1})$$

where k is a positive constant that gives dimensional consistency to the expression (Boltzmann's constant), p_i is the probability of occupancy of the i -th microstate, and W is the total number of microstates of the system. This expression recovers the Boltzmann-Gibbs-Shannon (BGS) entropy, $S_1 = -k \sum_i^W p_i \ln p_i$ when $q \rightarrow 1$.

Nonextensive statistical mechanics has induced generalizations in other fields, e.g., in mathematics. A pair of functions naturally appears from the very beginning of the formalism, namely the q -logarithm, and its inverse, the q -exponential, defined as (Tsallis, 1994)

$$\ln_q x = \frac{x^{1-q} - 1}{1 - q} \quad (x > 0), \quad (\text{A.2})$$

$$\exp_q x = \left[1 + (1 - q)x \right]_+^{1/(1-q)}, \quad (\text{A.3})$$

where $[x]_+ = \max\{x, 0\}$ and $\ln_q 1 = 0$, $\exp_q 0 = 1 \forall q$.

Gaussian distribution is the one that maximizes BGS entropy subject to constraints of normalizability and finiteness of second moment. This variational scheme was consistently generalized within the context of nonextensive statistical mechanics (Tsallis, 1995): if S_q is maximized with appropriate constraints, then the distribution that appears is the q -Gaussian:

$$p(x) = C_q \exp_q(-\zeta x^2), \quad (\text{A.4})$$

with

$$C_q = \left[\frac{\zeta(1-q)}{\pi} \right]^{1/2} \frac{\Gamma((5-3q)/2(1-q))}{\Gamma((2-q)/(1-q))}, \quad (\text{A.5})$$

for $q < 1$, and

$$C_q = \left[\frac{\zeta(1-q)}{\pi} \right]^{1/2} \frac{\Gamma(1/(1-q))}{\Gamma((3-q)/2(1-q))}, \quad (\text{A.6})$$

for $1 < q < 3$, and $\Gamma(\nu)$ is the Gamma function.

If the limit $q \rightarrow 1$ is taken, the q -Gaussian recovers the usual Gaussian distribution:

$$p(x) = \sqrt{\frac{\zeta}{\pi}} \exp(-\zeta x^2). \quad (\text{A.7})$$

The q -Gaussian function generalizes other widely used distributions: $q \rightarrow -\infty$ recovers Dirac distribution; $q=2$ recovers the Cauchy-Lorentz distribution, and for $q=3$, q -Gaussian becomes a flat distribution. There are other possibilities for generalizing the Gaussian distribution within nonextensive framework, see Prato and Tsallis (1999) for details.

Other distributions have been generalized along these lines, for instance, t - and r -Student's distributions (Souza and Tsallis, 1997). One special distribution of particular interest in RAM is the Weibull distribution. The q -Weibull distribution has been advanced by Costa *et al.* (2006):

$$p(x) = p_0 \frac{\beta x^{\beta-1}}{x_0^\beta} \exp_q \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^\beta \right]. \quad (\text{A.8})$$

Particular cases are q -exponential (Eq. (A.3)), for $\beta = 1$ and $q \neq 1$, and Weibull, for $\beta \neq 1$ and $q = 1$. This function have been applied to a variety of systems, like dielectric breakdown in oxides, basketball baskets, cyclone victims, brand-name drugs by retail sales, highway length (Picoli *et al.*, 2003; Costa *et al.*, 2006; Nadarajah and Kotz, 2007).

The main focus of this work is to present life distributions functions based on Tsallis statistics, in order to improve the modeling of reliability engineering problems. We show all functions deduced for life data analysis using the q -Weibull, q -exponential and q -lognormal distributions. The last section is dedicated to our conclusions.

A.2. LIFE DISTRIBUTIONS

A statistical distribution is fully described by its probability density function (*pdf*). Most functions commonly used in reliability engineering and life data analysis (reliability function, failure-rate function, mean-time function and median-life function) can be determined directly from the *pdf* definition.

Some distributions tend to better represent life data and are most commonly called life distributions. A life distribution shows how a population of components fails in time, or how the failures are distributed in time. It is just like any statistical distribution, except that the data involved are time-to-failure or life data. A life distribution is known when the type of distribution is selected for a proper fit and your parameters are estimated.

A.2.1. q -WEIBULL DISTRIBUTION

Weibull distribution is largely used in reliability context. The probability density function of the Weibull distribution in three-parameter form is defined by (Weibull, 1951)

$$f(t) = \frac{\beta(t-t_0)^{\beta-1}}{(\eta-t_0)^\beta} \exp \left(- \left(\frac{t-t_0}{\eta-t_0} \right)^\beta \right) \text{ with } t \geq t_0, \quad (\text{A.9})$$

where β is the shape parameter, η is the characteristic life and t_0 is the location parameter. Using the definition of q -exponential (Eq. (A.3)) for generalize Weibull distribution, the q -Weibull probability density function (Eq. (A.8)) can be rewritten as

$$f_q(t) = \frac{\beta(2-q)}{\eta-t_0} \left(\frac{t-t_0}{\eta-t_0} \right)^{\beta-1} \exp_q \left(- \left(\frac{t-t_0}{\eta-t_0} \right)^\beta \right) \text{ with } t \geq t_0. \quad (\text{A.10})$$

The reliability function is $R_q(t) = \int_t^\infty f_q(x)dx$, i.e.,

$$R_q(t) = \exp_{\frac{1}{2-q}} \left(- (2-q) \left(\frac{t-t_0}{\eta-t_0} \right)^\beta \right) \text{ with } t \geq t_0 \quad (\text{A.11})$$

and the unreliability function is defined as

$$F_q(t) = 1 - R_q(t) \quad (\text{A.12})$$

Taking into account that the q -logarithm is the inverse function of the q -exponential, Eq. (A.12) is straightforwardly converted into a linear relationship $y = \beta x - \beta \ln \alpha$ with the following transformation of variables: $y = \ln \left(- \ln_{\frac{1}{2-q}} (1 - F_q(t)) \right)$ and $x = \ln(t - t_0)$.

Sample data are times-to-failure rank in ascending order and an estimate of the unreliability can be obtained using an approximation of the median ranks, also known as Benard's approximation, given by (Johnson, 1951):

$$\hat{F}_i = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}, \quad (\text{A.13})$$

where n is the sample size, i is the order number of failure varying from 1 to n . In this way, for everyone of sampling time t_i we obtain:

$$x_i = \ln(t_i - t_0) \quad (\text{A.14})$$

$$y_i = \ln \left(-\ln \frac{1}{2-q} (1 - \hat{F}_i) \right) \quad (\text{A.15})$$

The straight line equation that better fit the sampling points (x_i, y_i) can be defined with least squares method. So, the parameter η is calculated by:

$$\eta = \exp \left(\frac{-b}{\beta} \right) (2-q)^{\frac{1}{\beta}} + t_0. \quad (\text{A.16})$$

Then, in this way, the q -Weibull distribution parameters are calculated.

A.2.2. q -EXPONENTIAL DISTRIBUTION

Employing the value $\beta = 1$ to the q -Weibull function (Eq.(A.10)) in order to obtain the q -exponential probability density function leads to:

$$f_q(t) = \frac{(2-q)}{\eta - t_0} \exp_q \left(-\left(\frac{t - t_0}{\eta - t_0} \right) \right). \quad (\text{A.17})$$

The reliability function is $R_q(t) = \int_t^{\infty} f_q(x) dx$, i.e.,

$$R_q(t) = \exp \frac{1}{2-q} \left(-\left(\frac{2-q}{\eta - t_0} t - t_0 \right) \right) \text{ with } t \geq t_0. \quad (\text{A.18})$$

and the unreliability function is:

$$F_q(t) = 1 - \exp \frac{1}{2-q} \left(-\left(\frac{2-q}{\eta - t_0} t - t_0 \right) \right) \text{ with } t \geq t_0. \quad (\text{A.19})$$

Taking into account that the q -logarithm is the inverse function of the q -exponential, Eq. (A.19) is straightforwardly converted into a linear relationship $y = \beta x - \beta \ln \alpha$ with the following transformation of variables: $y = \ln \left(-\ln \frac{1}{2-q} (1 - F_q(t)) \right)$ and $x = t - t_0$.

A.2.3. q -LOGNORMAL DISTRIBUTION

The q -lognormal distribution is originated from the lognormal that has a *pdf* with this format:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right). \quad (\text{A.20})$$

The lognormal distribution can be generalized by means of two different parameters, q_1 and q_2 , as:

$$f_{q_1, q_2}(t) = \frac{1}{K_{q_1, q_2} t} \exp_{q_1} \left(\frac{-1}{2} \left(\frac{\ln_{q_2} t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right), \quad (\text{A.21})$$

where μ is the geometrical mean, σ is the geometrical standard deviation of the time-to-failure, t is the time and K_{q_1, q_2} is a normalization factor, given by:

$$K_{q_1, q_2} = \int_0^{\infty} \frac{1}{x} \exp_{q_1} \left(\frac{-1}{2} \left(\frac{\ln_{q_2} x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right) dx \quad (\text{A.22})$$

The inverse function of $F_{q_1, q_2}(t)$, namely $\Phi^{-1}(p)$, returns the time value t to one in which $F(t) = p$ and may be calculated as the root in t of the following expression:

$$F_{q_1, q_2}(t) - p = 0. \quad (\text{A.23})$$

The probability density function and unreliability may be written too as:

$$f(T) = \frac{1}{K_{q_1, q_2} \sigma_L \sqrt{2\pi}} e_q \left(q_1, \frac{-1}{2} \left(\frac{T - \mu_L}{\sigma_L} \right)^2 \right), \quad (\text{A.24})$$

$$F(T) = \frac{\int_{-\infty}^T \frac{1}{\sigma_L} \exp_{q_1} \left(\frac{-1}{2} \left(\frac{x - \mu_L}{\sigma_L} \right)^2 \right) dx}{\int_0^{\infty} \frac{1}{x\sigma} \exp_{q_1} \left(\frac{-1}{2} \left(\frac{\ln_{q_2} x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right) dx}, \quad (\text{A.25})$$

where T is the q - logarithm of time-to-failure t , $f(T)$ is the probability density function of failure in T , $F(T)$ is the unreliability function in T , μ_L is the mean of q - logarithm of the time-to-failure and σ_L is the standard deviation of q - logarithm of the time-to-failure.

The $F(T)$ expression can be written as:

$$F(T) = \Phi \left(\frac{T - \mu_L}{\sigma_L} \right) \quad (\text{A.26})$$

or (applying the inverse function):

$$\Phi^{-1}(F(T)) = \frac{T - \mu_L}{\sigma_L}, \quad (\text{A.27})$$

$$\Phi^{-1}(F(T)) = \frac{1}{\sigma_L} T - \frac{\mu_L}{\sigma_L}. \quad (\text{A.28})$$

Eq. (A.28) can be rewritten as:

$$y = \frac{1}{\sigma_L} x - \frac{\mu_L}{\sigma_L} = ax + b. \quad (\text{A.29})$$

with $x = \ln_{q_2} t$ and $y = \ln_{q_2} (\Phi^{-1}(\hat{F}_i))$, where \hat{F}_i is the estimate of the unreliability and i is the order number of failure that has values of 1 to n .

Once defined the line, the σ_L parameter is calculated following Eq. (A.29), as bellow:

$$\sigma_L = \frac{1}{a}. \quad (\text{A.30})$$

The μ_L parameter is calculated by:

$$\mu_L = -b\sigma_L \quad (\text{A.31})$$

To calculate the mean and the standard deviation of time-to-failure it is required to use the following expressions:

$$\mu = \exp_{q_2} \left(\mu_L + \frac{1}{2} \sigma_L^2 \right) \quad (\text{A.32})$$

$$\sigma = \sqrt{\exp_{q_2} (2\mu_L + \sigma_L^2)} \times \sqrt{\exp_{q_2} (\sigma_L^2) - 1} \quad (\text{A.33})$$

A.3. CONCLUSION

There are many different statistical distributions that can be used to model life data. However, for some systems the classical life distributions are not satisfactory. For these cases, we use the definitions of q -exponential and q -logarithm for generalize the classical distributions, and present the q -type distributions, to improve modeling reliability engineering problems. For these, we wrote the probability density, the reliability and the unreliability functions of q -Weibull, q -exponential and q -lognormal distributions. Subsequently, the approximation of the median ranks and the least squares method are used to obtain the expressions to estimate the q -type distributions parameters. Then, the most functions commonly used in reliability engineering and life data analysis (reliability function, failure-rate function, mean-time function and median-life function) can be determined directly from the pdf definition and the parameter expressions.

ABBREVIATIONS

RAM : Reliability, Availability and Maintainability;

BGS : Boltzmann-Gibbs-Shannon;

pdf : probability density function.

REFERENCES

Costa, U. M. S., V. N. Freire, L. C. Malacarne, R. S. Mendes, S. Picoli Jr., E. A. de Vasconcelos & E. F. da Silva Jr. (2006). An improved description of the dielectric

- breakdown in oxides based on a generalized Weibull distribution. *Physica A*, Vol. 361, pp 209-215;
- Johnson, L. G. (1951). The Median Ranks of Sample Values in Their Population with an Application to Certain Fatigue Studies. *Industry Mathematics*, Vol. 2, pp 1-9;
- Nadarajah, S. & S. Kotz (2007). On the q-type distributions. *Physica A*, Vol. 377, pp 465-478;
- Picoli Jr., S., R. S. Mendes & L. C. Malacarne (2003). *q*-exponential, Weibull, and *q*-Weibull distributions: an empirical analysis. *Physica A*, Vol. 324, pp 678-688;
- Prato, D. & C. Tsallis (1999). Nonextensive foundation of Lévy distributions. *Phys. Rev. E*, Vol. 60, pp 2398-2401;
- Souza, A. M. C. de & C. Tsallis (1997). Students *t*- and *r*-distributions: Unified derivation from an entropic variational principle. *Physica A*, Vol. 236, pp 52-57;
- Tsallis, C. (1988). Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. *J. Stat. Phys.* Vol. 52, pp 479-487;
- Tsallis, C. (1994). What are the numbers that experiments provide? *Química Nova*, Vol. 17, pp 468-471;
- Tsallis, C., S. V. F. Levy, A. M. C. de Souza & R. Maynard (1995). Statistical-mechanical foundation of the ubiquity of Lévy distributions in nature. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 75, pp 3589-3593;
- Weibull, W (1951). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, Vol. 18, pp 293-297.