



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAÇÃO E
DIAGNÓSTICO APLICADO A VÁLVULAS MOTO-OPERADAS
UTILIZADAS EM CENTRAIS NUCLEARES**

ÁLVARO LUIZ GUIMARÃES CARNEIRO

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores.**

**Orientador:
Dr. Aucyone Augusto da Silva**

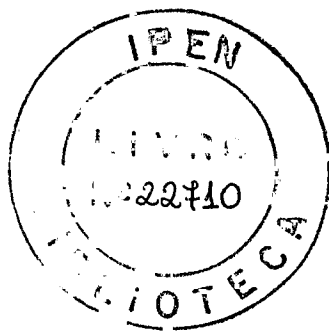
**São Paulo
2003**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**“DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAÇÃO E
DIAGNÓSTICO APLICADO A VÁLVULAS MOTO-OPERADAS
UTILIZADAS EM CENTRAIS NUCLEARES”**

Álvaro Luiz Guimarães Carneiro



Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores

Orientador:
Dr. Aucyone Augusto da Silva

São Paulo

2003

*Ao meu pai Álvaro (in memoriam) e minha mãe Dulce,
pelo carinho e orientação de uma vida honesta e saudável,
essencial para o sucesso e a minha irmã Céia.*

*Aos meus dois amores, minha esposa Janete e minha filha Luíza,
pelo incentivo, dedicação, lealdade, energia, e conjunção de ideais,
instrumentos vitais para o eterno amor e bem viver.*

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Aucyone Augusto da Silva, pela orientação da tese, e principalmente pela amizade e confiança demonstrada no decorrer desse trabalho.

Ao Dr. Daniel Kao Sun Ting, pelo apoio, espírito crítico e sugestões técnicas.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP), ao Superintendente Dr. Cláudio Rodrigues, em especial ao Centro de Engenharia Nuclear (CEN) por toda infra-estrutura fornecida e pela oportunidade concedida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro fornecido nas visitas técnicas à Universidade do Tennessee.

Ao Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade do Tennessee pela disponibilidade do banco de dados utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Belle R. Upadhyaya do Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade do Tennessee pelo expressivo apoio científico no desenvolvimento desta pesquisa.

À ELETRONUCLEAR, Unidades ANGRA I e ANGRA II, pelo intercâmbio técnico, em especial ao Departamento de Engenharia e Manutenção e sua equipe, Eng. Sérgio Dias, Eng. Marcio Rezende Siniscalchi, Eng. Francisco Carlos Sant'Anna da Silva e Eng. Antonio Zaroni Torres.

Ao Dr. Paulo Sérgio Brasko Ferreira pela amizade, apoio e sugestões.

Ao colega M.Sc. Paulo Henrique F. Masotti pela constante e inestimável colaboração nas discussões técnicas.

À colega M. Sc. Rosani Maria L. da Penha, pela contribuição nas sugestões e revisão do texto.

Aos colegas do grupo de monitoração e diagnóstico do CEN / IPEN, em especial ao Roberto Carlos dos Santos e ao Dr. Roberto Navarro de Mesquita, pela amizade e apoio.

Aos colegas do CEN em especial à Dra. Gaianê Sabundjian, à M. Sc. Margaret de Almeida Damy, ao Dr. Ulysses D'Utra Bitelli, ao Gelson Toshio Otani e a todos que de alguma forma colaboraram para o sucesso deste trabalho.

***“DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAÇÃO E DIAGNÓSTICO APLICADO
A VÁLVULAS MOTO-OPERADAS UTILIZADAS EM CENTRAIS NUCLEARES”***

ALVARO LUIZ GUIMARÃES CARNEIRO

RESUMO

A questão da confiabilidade dos componentes, mais especificamente as válvulas moto-operadas, tornou-se um dos fatores mais importante a serem investigados nas centrais nucleares, no que diz respeito à segurança e extensão de vida útil da instalação. Com isto, a necessidade de melhorias nos métodos de monitoração e diagnóstico passou a ser de extrema relevância no campo da manutenção preditiva, estabelecendo como meta principal a confiabilidade da operação dos componentes. Em plantas nucleares, a manutenção preditiva contribui principalmente no fator segurança, no sentido de diagnosticar com antecedência a ocorrência de uma possível falha em um determinado componente, evitando consequências mais severas, assim como no aspecto econômico estabelecendo uma melhor programação na manutenção, reduzindo paradas inesperadas da planta. O desenvolvimento de métodos não intrusivos de monitoração e diagnóstico torna possível a identificação de falhas em componentes durante a operação normal da planta. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema integrado de monitoração e diagnóstico aplicado a válvulas moto-operadas utilizadas em centrais nucleares. A metodologia utilizada neste projeto é baseada na análise da assinatura da potência elétrica do motor, obtida durante a movimentação do ciclo de abertura e fechamento da válvula. Uma vez obtida a medida da assinatura padrão da válvula, é possível detectar desvios em determinados parâmetros ao longo da vida operacional da válvula, identificando falhas incipientes na válvula. O sistema utiliza duas técnicas paralelas para detecção e caracterização de falhas: Sistema Especialista, implementado através da Lógica Nebulosa baseada em um conjunto de regras desenvolvidas através de um banco de conhecimento; a segunda técnica consiste na utilização da Transformada de Wavelet, onde o objetivo principal constitui em obter informações mais detalhadas contidas nos sinais medidos, identificando e caracterizando fenômenos transientes no domínio tempo – frequência, correlacionando-os a situações de falhas no estado incipiente. O sistema de monitoração e diagnóstico foi desenvolvido e implementado na plataforma MATLAB, que é uma linguagem computacional de alto desempenho, integrando de forma eficiente os ambientes de programação e visualização. Os resultados obtidos foram de grande relevância proporcionando uma metodologia qualitativa de monitoração e diagnóstico para as condições operacionais de válvulas moto-operadas.

“DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTIC SYSTEM FOR MOTOR-OPERATED VALVES USED IN NUCLEAR POWER PLANT”

ALVARO LUIZ GUIMARÃES CARNEIRO

ABSTRACT

The reliability question of the components, specifically of motor operated-valves, became one of the most important issues to be investigated in nuclear power plants, considering security and life plant extension. Therefore, the necessity of improvements in monitoring and diagnosis methods started to be of extreme relevance in the maintenance predictive field, establishing as main goal the reliability and readiness of the system components. Specially in nuclear power plants, the predictive maintenance contributes in the security factor in order to diagnosis in advance the occurrence of a possible failure, preventing severes situations. It also presents a contribution on the economic side by stablishing a better maintenance programming, and reducing unexpected shutdown. The development of nonintrusive monitoring and diagnostic method makes it possible to identify malfunctions in plant components during normal plant operation. This dissertation presents the development of an integrated condition monitoring system for motor-operated valves used in nuclear power plants. The methodology used in this project is based on the electric motor power signatures analysis, during the closing and opening stroke time of the valve. Once the measurements baseline diagnostic of the motor-operated valve is taken, it is possible to detect long-term deviations during valve lifetime, detecting in advance valve failures. The system implements two parallel techniques for detection and categorization of anomalies: Expert System using fuzzy logic based on rules and knowledge base, providing a systematic approach for decision making, and the Wavelet Transform Technique, where the main goal is to obtain more detailed information contained in the measured data, identifying and characterizing the transients phenomena in the time and frequency domains, correlating them to failures situatios in the incipient stage. The conditioning monitoring and diagnostic system was designed and implemented at the MATLAB plataform, which is a powerfull language with high performance. The developed system has provided good results stablishing a new qualitative methodology for monitoring and diagnostic of motor operated valves.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	4
2.1 ASPECTOS RELEVANTES E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	4
3 HISTÓRICO	6
4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
4.1 VÁLVULA MOTO-OPERADA	8
4.1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	8
4.1.2 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO	9
4.1.3 TIPOS DE VÁLVULAS MOTO-OPERADAS	10
4.1.4 ANOMALIAS EM VÁLVULAS MOTO-OPERADAS	13
4.2 ANÁLISE DA POTÊNCIA ELÉTRICA	14
5 MATERIAIS E MÉTODOS	16
5.1 SISTEMA DE MEDIDA E PROCESSAMENTO DE SINAIS	17
5.2 BASE DE DADOS	18
5.3 ANÁLISE DOS SINAIS	20

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
7.1 RESULTADOS OBTIDOS COM APLICAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA	81
7.2 RESULTADOS OBTIDOS COM APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DISCRETA DE WAVELET	82
8. CONCLUSÃO	83
8.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
APÊNDICE “A”: PROGRAMA MENUP	85
APÊNDICE “B”: PROGRAMA NORM_DIAG	98
APÊNDICE “C” – PROGRAMA FUZZY.FIS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Componentes básicos da válvula moto-operada.....	9
2	Válvula do tipo gaveta.....	10
3	Válvula moto-operada, tipo gaveta, visão geral.....	10
4	Válvula do tipo globo.....	11
5	Vista de uma válvula moto-operada do tipo globo.....	11
6	Válvula do tipo borboleta.....	12
7	Válvula moto-operada do tipo borboleta.....	12
8	Circuito equivalente de um motor elétrico por fase.....	14
9	Diagrama de blocos do sistema de monitoração e diagnóstico.....	16
10	Sistema de medida e processamento de sinais.....	17
11	Diagrama de blocos do sistema com os programas implementados.....	22
12	Principais componentes do sistema especialista.....	25
13	Diagrama de blocos do sistema especialista via lógica nebulosa.....	33
14	Fuzzificação de uma variável de entrada.....	34
15	Método do centro de gravidade.....	35
16	Defuzzificação por centro de gravidade.....	35
17	Assinatura de potência com eventos característicos ciclo de fechamento	37
18	Assinatura de potência com eventos característicos ciclo de abertura.....	37
19	Principais componentes dos sinais primitivos (a,b,c).....	39
20	Diagrama de blocos do algoritmo de extração dos sinais primitivos.....	40
21	Etapas do algoritmo de extração dos sinais primitivos.....	41
22	Assinaturas de potência com os eventos característicos.....	42
23	Parâmetros de saída do módulo extração de eventos.....	43
24	Diagrama de blocos da análise via sistema especialista-lógica nebulosa	44
25	Funções de pertinência do sistema.....	45
26	Etapas de normalização-condição de diagnóstico.....	46
27	Diagrama de blocos - variáveis de análise do sistema especialista.....	46
28	Tela do módulo de extração de eventos (ciclo fechamento).....	49
29	Seqüência de telas da etapa de normalização.....	50
30	Tela de acionamento do comando fuzzy.....	50

31	Sistema Fuzzy de inferência.....	51
32	Tela com as variáveis de entrada / saída e funções de pertinência.....	51
33	Tela com apresentação de um conjunto de regras.....	52
34	Tela com as variáveis de entrada e saída com os respectivos valores.....	53
35	Plano tempo-escala (wavelet).....	54
36	Efeito da variação do valor da escala (parâmetro “ <i>a</i> ”).....	55
37	Deslocamento contínuo da wavelet no tempo (parâmetro “ <i>b</i> ”).....	55
38	Dilatação/compressão e deslocamento da transf. discreta de wavelet....	56
39	Bloco básico de decomposição do sinal.....	57
40	Decomposição do sinal em árvore.....	57
41	Apresentação de algumas funções wavelets.....	58
42	Sinal original e sinais de aproximação e decomposição, db4 nível 6.....	60
43	Decomposição em árvore e sinais original e aproximação nível 6.....	60
44	Ilustração das condições do diagnóstico.....	62
45	Arquivo UT1BLCO – assinatura padrão.....	64
46	Arquivo UT1MLSCO – desajuste chave limite.....	65
47	Arquivo UT2BLCO – assinatura padrão.....	66
48	Arquivo UT2MLSCO – desajuste chave limite.....	67
49	Arquivo UT2FELTCO – falha elétrica.....	68
50	Arquivo UT2BBARCO – obstrução na haste.....	69
51	Arquivo UT1BLOC – assinatura padrão.....	70
52	Arquivo UT1MTSOC – desajuste chave torque.....	71
53	Arquivo UT1OBSOC – obstrução na sede.....	72
54	Arquivo UT2BLOC – assinatura padrão.....	73
55	Arquivo UT2MTSOC– desajuste chave torque.....	74
56	Evolução de falhas, obstrução na movimentação.....	76
57	Sinal original e as decomposições.....	76
58	Análise de evolução de falha - ciclo total.....	77
59	Análise de evolução de falha na região de movimentação da haste.....	77
60	Assinaturas – evolução de falha de desgaste de engrenagem.....	78
61	Análise do sinal com falha real.....	79
62	Evolução da falha - ciclo total de movimentação.....	80
63	Evolução da falha na região de movimentação.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela	Título	Página
1	Base de dados.....	19
2	Situações do diagnóstico.....	48
3	Legenda da Figura 32.....	52
4	Relatório de saída – Diagnóstico via sistema especialista.....	53
5	Resultados obtidos-análise dos sinais no ciclo de abertura.....	63
6	Resultados obtidos-análise dos sinais no ciclo de fechamento	63
7	Arquivo UT1BLCO – RESULTADOS.....	64
8	Arquivo UT1MLSCO – RESULTADOS.....	65
9	Arquivo UT2BLCO – RESULTADOS.....	66
10	Arquivo UT2MLSCO – RESULTADOS.....	67
11	Arquivo UT2FELTCO – RESULTADOS.....	68
12	Arquivo UT2BBARCO – RESULTADOS.....	69
13	Arquivo UT1BLOC – RESULTADOS.....	70
14	Arquivo UT1MTSOC – RESULTADOS.....	71
15	Arquivo UT1OBSOC – RESULTADOS.....	72
16	Arquivo UT2BLOC – RESULTADOS.....	73
17	Arquivo UT2MTSOC - RESULTADOS.....	74

ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME: American Society of Mechanical Engineers
CCM: Centro de Controle de Motores
CD: Condição de Diagnóstico
CEN: Centro de Engenharia Nuclear
CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CWT: Continuous Wavelet Transform
DWT: Discrete Wavelet Transform
EPRI: Electric Power Research Institute
FN: Fator de Normalização
GL: Generic Letter
INPO: Institute of Nuclear Power Operations
IPEN: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
MAC: Motor Actuator Characterizer
MCDS: Microprocessor Control and Diagnostics System
MOV: Motor-Operated Valve
MOVATS: Motor Operated Valve Analysis and Test System
NPARP: Nuclear Plant Aging Research Program
NRC: Nuclear Regulatory Commission
NSF: National Science Foundation
ORNL: Oak Ridge National Laboratory
PECI: Programa Especial de Cooperação Internacional
RMS: Root Mean Square
USCFR: United States Code of Federal Regulations
UT: University of Tennessee
VMO: Válvula Moto-Operada
VMODS: Valve Motor Operator Diagnostic System
VOTES: Valve Operation Test and Evaluation System

1 INTRODUÇÃO

A questão do envelhecimento dos componentes das plantas nucleares^{/1,2/} tem sido exaustivamente estudada e tratada como um dos pontos mais importantes no que diz respeito à segurança e extensão da vida útil da instalação^{/3/}. Com isto, a necessidade de melhorias nos métodos de testes, monitoração e diagnóstico passou a ser de extrema relevância no campo da manutenção preditiva, estabelecendo como meta principal a confiabilidade da operação dos componentes^{/4/}.

A manutenção preditiva^{/5,6/} contribui principalmente no fator segurança, no sentido de diagnosticar com antecedência a ocorrência de uma possível falha em um componente^{/7,8/}, evitando conseqüências mais severas^{/9/}. Além disso, a manutenção preditiva apresenta uma contribuição sobre o ponto de vista econômico, de maneira a estabelecer uma melhor programação da manutenção, reduzindo as paradas imprevistas devido a problemas inesperados e com isto disponibilizar a planta para a geração de energia elétrica quase que na sua totalidade do tempo de operação previsto.

O gerenciamento e o planejamento da manutenção, assim como a otimização dos custos relativos^{/10/}, são tarefas difíceis nos dias de hoje por se tratar de um trabalho extremamente complexo devido a fatores tais como: elevação dos requisitos de segurança durante operação da planta, aumento do número de leis ambientais, complexidade dos sistemas instalados e o controle da confiabilidade desses sistemas.

Em plantas nucleares são utilizados diversos tipos de válvulas como: válvulas operadas a ar comprimido, a solenóides e a motores elétricos, também chamadas válvulas moto-operadas (VMO), ou "*motor-operated valve*" (MOV) que constitui o enfoque principal da presente tese.

As válvulas moto-operadas têm como papel principal a operação dos sistemas de segurança e a perda do controle desses sistemas pode acarretar situações emergenciais.

As investigações técnicas das válvulas moto-operadas^{/11/} vão desde as análises dos materiais envolvidos na fabricação^{/12/} até testes mais específicos, como em situações de análise sísmica^{/13/}.

Portanto, para a melhoria na confiabilidade^{/14/} de operação da planta e a consequente redução nos custos de manutenção, resultou o cuidado especial dirigido à monitoração das válvulas moto-operadas^{/15/}.

Toda esta atenção voltada à confiabilidade de operação dos componentes, mais especificamente tratando das válvulas moto-operadas, teve um impulso maior com o advento das instruções normativas editadas pelo órgão regulador “*Nuclear Regulatory Commission*” (N.R.C.) e “*American Society of Mechanical Engineers*” (ASME).

As primeiras instruções normativas relacionadas a testes e supervisão de válvulas moto-operadas são datadas de junho de 1989, trata-se da “*Generic Letter*” (G.L.) Nº 89-10^{/16/}.

Este documento é também conhecido como 10 CFR 50.54f, trata-se da seção 50.54(f) do título 10 do “*United States Code of Federal Regulations*” (USCFR).

Atualmente esta instrução normativa possui sete suplementos^{/17-23/} que tratam basicamente de fatores relacionados a testes, programas de manutenção, gerenciamento de suporte técnico e coordenação de engenharia.

A G.L. 89-10 suplemento “5” é dirigida aos sistemas de monitoração, relatando recomendações, avaliações de melhorias, ações corretivas e tendências de problemas^{/21/}.

Dados percentuais originados de custos anuais em manutenção na indústria^{/24/} e direcionados a sistemas de controle e segurança envolvendo mais especificamente válvulas, apontam a ordem de 30% do orçamento total previsto para manutenção.

Além disso, estimativas indicam valores percentuais de 20% relacionados a paradas não programadas em usinas nucleares americanas devido a problemas relacionados a válvulas^{/25/}.

Sendo assim, justificativas de ordem econômica^{/26/} têm sido destacadas por investimentos em desenvolvimentos e aplicações de técnicas de monitoração das condições operacionais dos componentes mais vulneráveis à ocorrência de falhas^{/27,28/}.

A demanda da necessidade de monitoração e diagnóstico de falhas de componentes em processos dinâmicos de instalações industriais fez com que esforços se concentrassem em desenvolver novas técnicas de análise de dados^{/29/}, contribuindo significativamente na segurança, manutenção e extensão da vida útil da instalação.

A principal tarefa nessa evolução tecnológica consiste em obter informações mais detalhadas contidas nos dados medidos através das técnicas de processamento de sinais.

Nos últimos anos, o Centro de Engenharia Nuclear (CEN) do IPEN vem desenvolvendo trabalhos de pesquisa na área de monitoração e diagnóstico, sendo alguns deles em parcerias com instituições internacionais objetivando a especialização e competência em metodologias de manutenção preditiva, sendo esses aspectos os pontos principais para a motivação no desenvolvimento deste trabalho.

Este projeto traz contribuições significativas, pois é de aplicação direta, além disso transcende a aplicação na área nuclear devido a larga utilização das válvulas moto-operadas na indústria em geral, destacando-se, indústrias químicas, petroquímicas, farmacêuticas e alimentícias.

A presente tese apresenta de forma qualitativa uma metodologia de como pode ser tratada a questão da monitoração e diagnóstico de falhas em válvulas moto-operadas, de forma a gerar os meios necessários para a avaliação precisa da condição operacional destas válvulas.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um sistema não intrusivo de monitoração e diagnóstico, aplicado a válvulas moto-operadas do tipo gaveta e globo, utilizadas em sistemas de segurança de centrais nucleares de potência, identificando com antecedência a ocorrência de possíveis falhas mecânicas e ou elétricas, intrínsecas do conjunto motor, atuador e válvula.

O sistema de monitoração não intrusivo atua de forma remota na obtenção das medidas dos sinais que compõem a assinatura da potência a ser analisada, permitindo dessa maneira a não intervenção na operação normal da planta, o que traz inúmeros benefícios operacionais.

O sistema utiliza técnicas avançadas de medidas, processamento e análise de sinais direcionadas à obtenção de um diagnóstico qualitativo das condições operacionais elétricas e mecânicas de válvulas moto-operadas.

A monitoração e diagnóstico das válvulas moto-operadas é realizada baseada na análise da assinatura de potência elétrica do motor durante a movimentação de abertura e fechamento das válvulas.

Este trabalho vai ao encontro das metas e objetivos do CEN e do IPEN, na pesquisa e desenvolvimento de novas metodologias de monitoração e diagnóstico, aplicadas na manutenção preditiva.

2.1 ASPECTOS RELEVANTES E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Como aspectos relevantes e contribuições do trabalho destacam-se:

- Proposta inédita da aplicação da Transformada de “Wavelet” para identificação e caracterização de fenômenos transientes em regime dinâmico de sinais elétricos de válvulas moto-operadas, permitindo a localização dos eventos no tempo e escala, correlacionando-os às situações de falhas incipientes do componente no sistema.

- Utilização de um sistema especialista, que corresponde a uma ferramenta da Inteligência Artificial, composto por métodos inferenciais, implementados através da lógica nebulosa, constituída por banco de conhecimento, base de regras e dispositivo de inferência, tratando-se de uma importante ferramenta na tomada de decisão.
- Em termos nacionais, é o primeiro sistema de monitoração e diagnóstico desenvolvido e aplicado às válvulas moto-operadas utilizadas em plantas nucleares de potência, proporcionando uma identificação de eventos característicos de falhas no estado incipiente.
- Implementação futura desse sistema nas usinas nucleares brasileiras^{/30,31/}, uma vez que todo trabalho de diagnóstico de válvulas moto-operadas instaladas nas usinas nucleares Angra I e Angra II, é realizado por empresas estrangeiras.
- Abrangência da aplicação do sistema, uma vez que não se restringe a plantas nucleares, sendo possível a implementação em outros tipos de plantas industriais, destacando-se como potencial as indústrias petroquímicas.
- Contribuição técnica e científica em termos de especialização profissional através de parcerias com instituições nacionais e internacionais de excelência na área de manutenção preditiva: a Eletronuclear através das usinas nucleares Angra I e Angra II, e a Universidade do Tennessee – EUA, através do Departamento de Engenharia Nuclear.

3 HISTÓRICO

Esta revisão bibliográfica tem como objetivo estabelecer o estado da arte referente aos trabalhos relacionados a sistemas de diagnósticos aplicados a válvulas moto-operadas.

No início da década de 80, constam trabalhos realizados como parte do programa de pesquisa de envelhecimento de plantas nucleares N.P.A.R.P.^{11/} (*Nuclear Plant Aging Research Program*) e ainda com maior importância no final da década de 80 (junho de 1989), destaca-se as publicações das instruções normativas^{16/} determinadas pelo N.R.C. e A.S.M.E.

O primeiro sistema desenvolvido foi o MOVATS^{4,32/} (*Motor Operated Valve Analysis and Test System*) da MOVATS INC, USA, disponível comercialmente em 1987. Este sistema trata-se de um dispositivo que analisa sinais elétricos do deslocamento da caixa de molas, atuação das chaves limite e torque, e corrente do motor.

Em 1989 aparece o sistema VOTES^{33/} (*Valve Operation Test and Evaluation System*), desenvolvido pela *Liberty Technology Center, Inc, USA*, que monitora os parâmetros de força atuante na haste da válvula, atuação das chaves limite e torque, e corrente do motor.

No final de 1989 surgiu o VMODS^{34/} (*Valve Motor Operator Diagnostic System*), desenvolvido e comercializado por *Wyle Laboratories, Inc, USA*. Este sistema monitora os mesmos parâmetros do sistema anterior e inclui análise do espectro de frequência da corrente do motor.

Os sistemas subsequentes, basicamente monitoram os mesmos parâmetros, incluindo sensores de temperaturas e vibração^{35,36/}. São eles, MAC (*Motor Actuator Characterizer*) desenvolvido pela *Limitorque Corporation* e o MCDS (*Microprocessor Control and Diagnostics System*) que são uma extensão do sistema anterior, utilizando microprocessador, projeto este desenvolvido por *Foster Miller, Inc*, com suporte financeiro do EPRI (*Electric Power Research Institute*).

Em 1993, foi desenvolvido pelo IST (Institut für Sicherheitstechnologie GmbH) em Garching, em parceria com a SIEMENS (Power Generation Group), Alemanha, o sistema DAW-MCC^{37/} (unidade para diagnóstico de válvulas moto-operadas).

O sistema DAW-MCC permite aquisição dos parâmetros elétricos (tensão e correntes das fases), sinais dos atuadores e parâmetros mecânicos como: deslocamento da caixa de molas, ângulo de rotação e força na haste.

Os parâmetros elétricos assim como os sinais dos atuadores podem ser obtidos diretamente no centro de controle de motores. Todos esses parâmetros são armazenados no módulo VSS-DB^{/37/} (Valve Diagnosis System), que constitui a estrutura de armazenamento dos dados, para que posteriormente, tais parâmetros sejam analisados e comparados com os valores estabelecidos de projeto.

No início da década de 90, o ORNL (Oak Ridge National Laboratory) como participante do N.P.A.R.P., realizou um trabalho de avaliação^{/21/} dos sistemas de diagnóstico, assim como os parâmetros monitorados pelos sistemas. A conclusão do trabalho mostrou como maior potencial o método da análise da corrente, devido a riqueza de informações contidas nas assinaturas das correntes do motor, ressaltando como fator importante a monitoração remota.

Como consequência desta avaliação, tiveram início os trabalhos de pesquisa voltados à monitoração de válvulas moto-operadas desenvolvidos pelo Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade do Tennessee. Esses trabalhos utilizaram inicialmente a análise do sinal das correntes^{/38/} das fases do motor e posteriormente a análise da potência^{/39/}, tendo como parâmetros de monitoração as correntes e tensões das fases.

A proposta desenvolvida nesta tese, adotou principalmente a possibilidade da aquisição remota das medidas dos parâmetros e deu continuidade à pesquisa de processamento e análise dos sinais baseada nas assinaturas de potência obtidas durante a movimentação dos ciclos de abertura e fechamento das válvulas moto-operadas.

Como continuidade da pesquisa, neste trabalho foram introduzidas técnicas inovativas de processamento e análise dos sinais através da aplicação de Sistema Especialista implementado via Lógica Nebulosa e a utilização da Transformada de Wavelet para identificação de fenômenos transientes na região da movimentação da válvula durante os ciclos de abertura e fechamento.

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 VÁLVULA MOTO-OPERADA

4.1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A finalidade de uma válvula instalada em um processo consiste em controlar o fluxo de um determinado fluido em um sistema constituído de tubulações, vasos e máquinas, através da sua abertura e fechamento, modulando ou obstruindo o fluxo do fluido por si mesma.

A aplicação ou uso fundamental da válvula moto-operada se dá em situações adversas como:

-linhas de tubulação extensas; alta pressão, temperatura e fluxo; local de difícil acesso ou periculosidade elevada para o operador; condições onde é requerido posicionamento rápido, regime de trabalho com alta frequência de manobras; controle automático de processo onde as válvulas operam em duas posições extremas ou com reposicionamento intermediário (modulação) e por último onde a isolação é desejada.

Vantagens e desvantagens na utilização da válvula moto-operada:

Vantagens:

-Motores elétricos possuem alta velocidade rotacional proporcionando alta energia cinética garantindo a abertura e fechamento da válvula,

-Habilidade de interfacear com sistemas computadorizados,

-Circuitos elétricos são operados instantaneamente a longas distâncias,

-Interface entre o motor e o controle remoto é um contato, o qual apresenta menos problemas de confiabilidade comparado a outros tipos de válvula,

-O sistema de controle e atuador podem ser completamente testados sem a necessidade de movimentação da válvula,

-Usualmente é necessário trazer apenas dois cabos até a localização do atuador, um para potência e o outro para controle independentemente do grau de sofisticação do sistema de instrumentação e controle.

Desvantagens: vulnerabilidade a altas temperaturas e impurezas, requerendo alta integridade de encapsulamento.

4.1.2 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

A válvula moto-operada é constituída basicamente de duas partes: motor-atuador, incluindo o trem de engrenagens e redutor, e a sede da válvula.

A operação da válvula moto-operada basicamente se dá através do motor que comanda a rotação do conjunto de engrenagens (redutor) que é conectado à haste da válvula.

A haste da válvula movimenta-se verticalmente, através de conexão do tipo coroa e pinhão, abrindo, modulando ou obstruindo totalmente a passagem do fluido via o obturador.

O comando de desligamento da alimentação elétrica do motor, ou seja as paradas das movimentações de abertura e fechamento da válvula, é feito via contato da chave limite e chave de torque.

A Figura 1 apresenta os componentes básicos de funcionamento de uma válvula moto-operada.

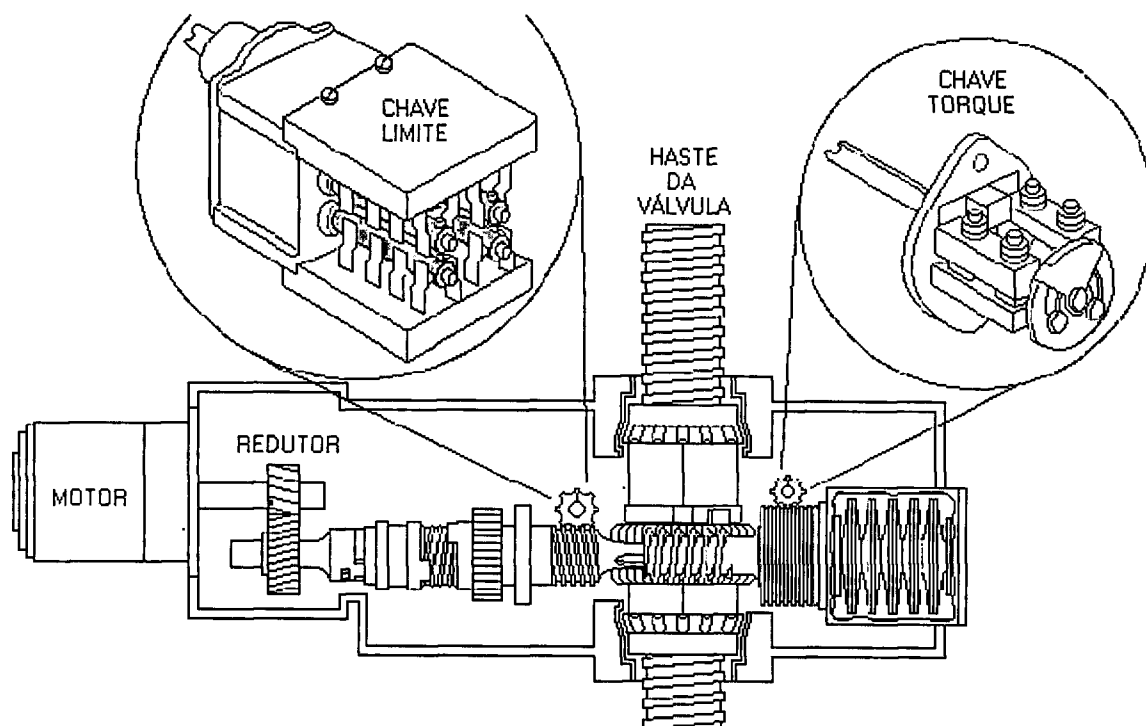


FIGURA 1: Componentes básicos da válvula moto-operada.

4.1.3 TIPOS DE VÁLVULAS MOTO-OPERADAS

As válvulas são caracterizadas basicamente pela direção do fluxo do fluido na área de assentamento (sede) e seu dispositivo de fechamento (obturador). Os tipos de válvulas mais usadas são: gaveta ("gate"), globo ("globe") e borboleta ("butterfly").

A válvula do tipo gaveta (FIG. 2) possui um dispositivo de fechamento ou obturador que move em linha direta a área de assentamento e perpendicular a direção do fluxo do fluido. A Figura 3 apresenta uma visão geral, motor, atuador e válvula.

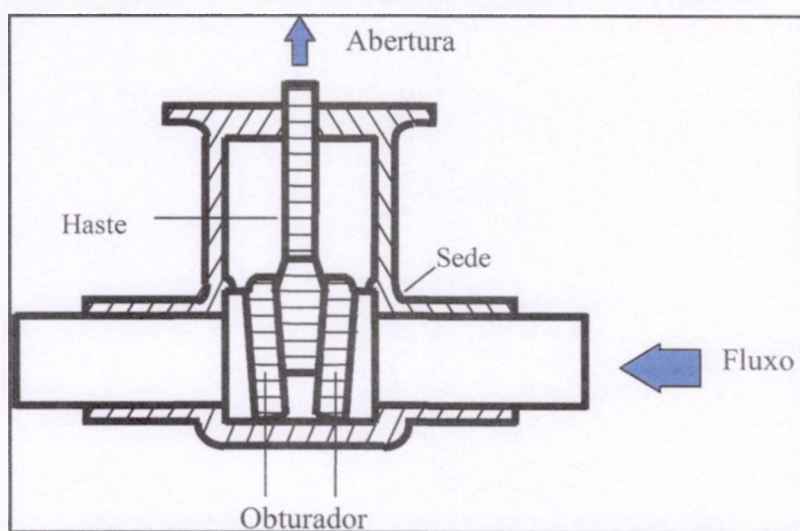


FIGURA 2: Válvula do tipo gaveta.

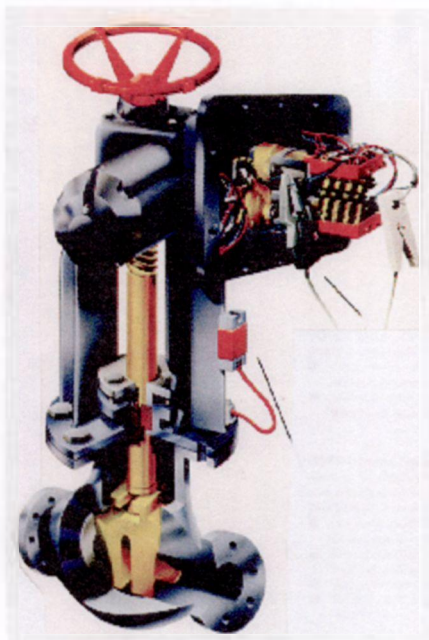


FIGURA 3: Válvula moto-operada, tipo gaveta, visão geral.

A válvula do tipo globo (FIG. 4,5) possui o obturador que move em linha direta à área de assentamento e paralela à direção do fluxo.

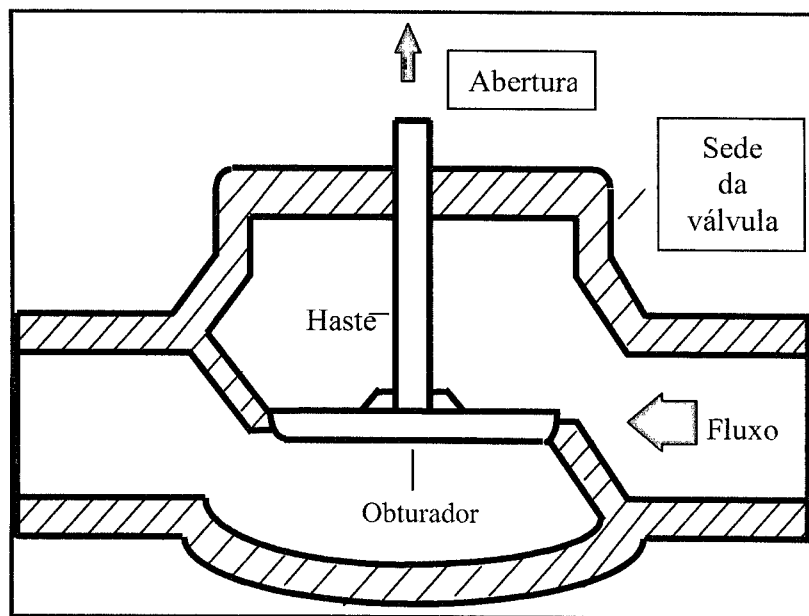


FIGURA 4: Válvula do tipo globo.

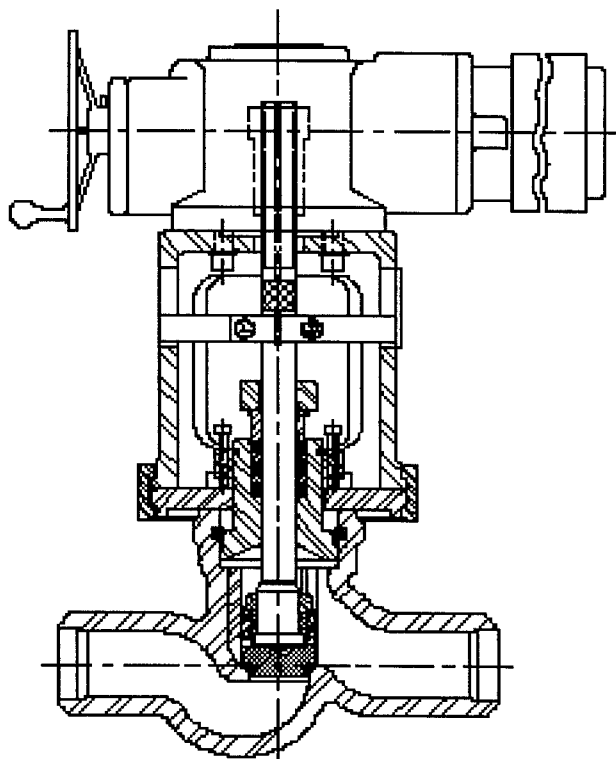


FIGURA 5: Vista de uma válvula moto-operada do tipo globo.

A válvula do tipo borboleta (FIG.6), possui o obturador que move em direção rotacional e na posição de abertura o fluxo do fluido passa ao redor do dispositivo.

A Figura 7, apresenta uma visão geral da válvula moto-operada do tipo borboleta.

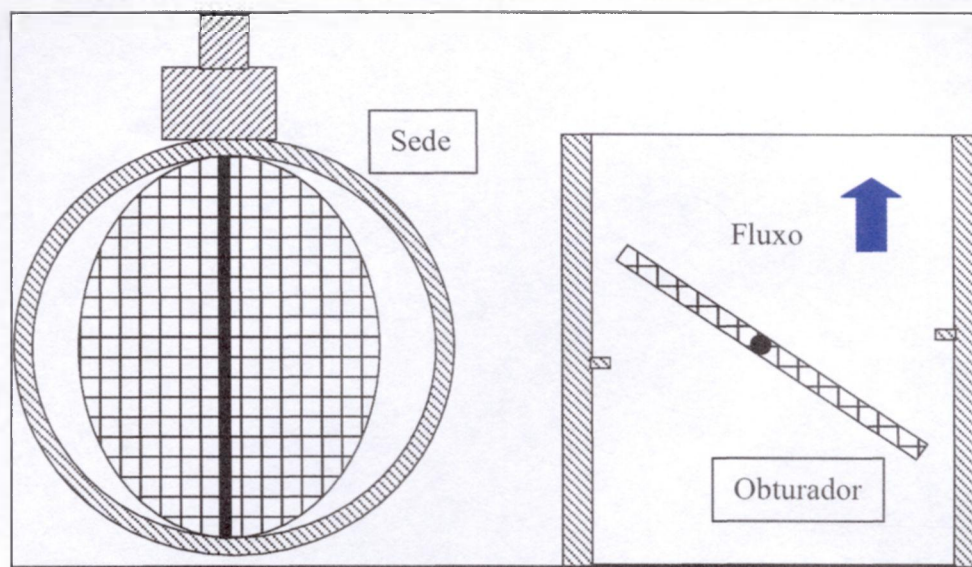


FIGURA 6: Válvula do tipo borboleta.

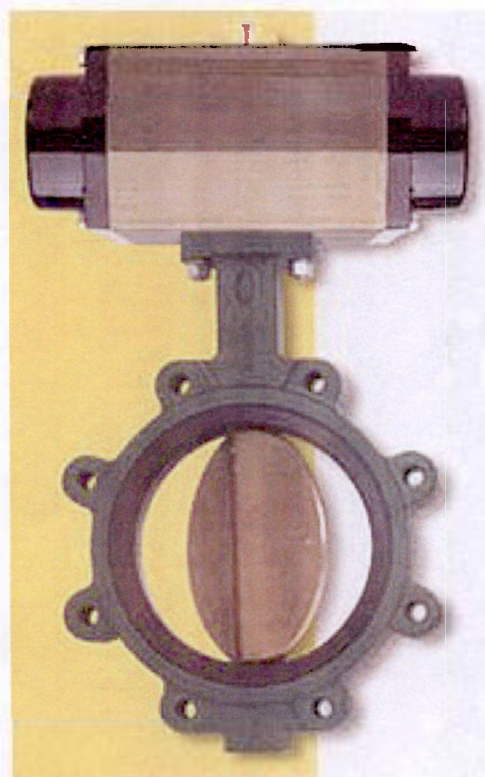


FIGURA 7: Válvula moto-operada do tipo borboleta.

4.1.4 ANOMALIAS EM VÁLVULAS MOTO-OPERADAS

As válvulas moto-operadas estão sujeitas a cargas e estresses provenientes dos sistemas de controle por onde são conectadas, sistemas de potência por onde são alimentadas eletricamente e dos próprios fluidos sob à ação dos quais elas operam. Desta maneira, as válvulas moto-operadas são vulneráveis a desgastes parciais ou até mesmo a extremos que resultam em situações de não operabilidade^{/40-42/}.

O “*Institute of Nuclear Power Operations*”^{/43/} (INPO), que agrega um grande número de usinas nucleares em operação por todo mundo, realizou um estudo através da análise dos dados provenientes de registros de falhas em válvulas moto-operadas submetidos ao NRC, apresentando os seguintes resultados:

- Falhas eletromecânicas (32%)
 - ajuste da chave limite
 - ajuste da chave de torque

- Falhas elétricas (27%):
 - motor
 - contatos
 - outros

- Falhas mecânicas (22%)
 - desgaste de engrenagens
 - desgaste da sede da válvula
 - envergamento da haste da válvula

- Outros (19%)
 - Corrosão, vibração, selagem, etc.

4.2 ANÁLISE DA POTÊNCIA ELÉTRICA

A metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho consiste na análise da assinatura da potência elétrica do motor^{/44-47/} obtida durante a movimentação de abertura e fechamento da válvula.

As condições mecânicas e elétricas de uma válvula moto-operada podem ser monitoradas através da análise da medida da potência elétrica do motor, o qual comanda a movimentação da válvula.

A Figura 8 apresenta o circuito equivalente de um motor elétrico.

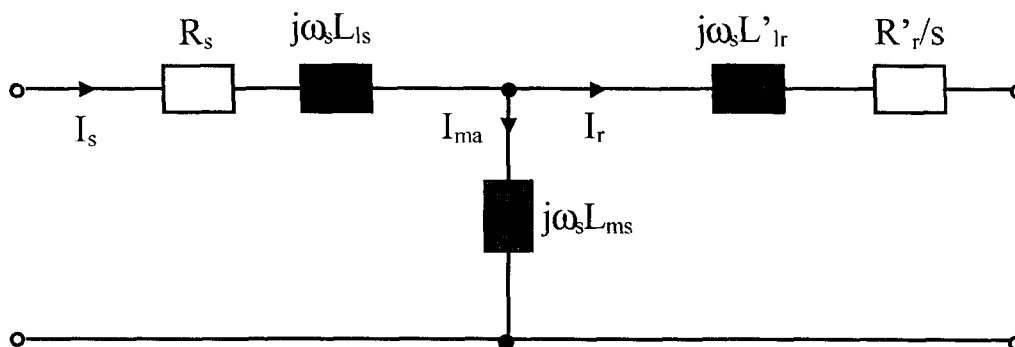


FIGURA 8: Circuito equivalente de um motor elétrico por fase.

Os subscritos “s” e “r” referem-se ao estator e rotor do motor respectivamente, I_{ma} é a corrente de magnetização, I_s corrente do estator, I_r corrente do rotor e o restante são cargas resistivas e impedâncias indutivas referentes ao estator e rotor.

A notação (') refere-se aos valores das impedâncias do rotor normalizadas com relação ao estator.

O termo “S” é denominado de deslizamento e consiste na diferença entre a velocidade rotacional do campo magnético e a velocidade rotacional do rotor.

Quando uma carga mecânica é conectada, o rotor reduz a velocidade rotacional aumentando, portanto, o deslizamento que, por consequência eleva a tensão induzida, a corrente do rotor e finalmente o torque, até atingir o valor exigido pela carga.

Correlacionando o fundamento teórico apresentado à aplicação do trabalho de monitoração e diagnóstico de válvulas moto-operada, observamos que durante a movimentação de abertura e fechamento da válvula, surgem variações mecânicas na carga acoplada ao motor elétrico. Essas variações mecânicas induzem transientes no sinal da potência elétrica do motor e são observadas na assinatura da potência.

A potência elétrica de um sistema monofásico é dada pela equação:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

Onde P é a potência ativa, U e I são os valores da tensão e corrente e φ é o ângulo de fase entre a corrente e a tensão. A potência ativa é definida como a potência utilizada para desenvolver um trabalho mecânico.

Para um sistema trifásico a equação da potência elétrica é dada por:

$$P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + U_3 \cdot I_3 \cdot \cos \varphi_3 \quad (2)$$

Onde U_i e I_i refere-se a corrente e tensão por fase. Para a condição de fases balanceadas em um sistema trifásico a potência é dada por:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

Nesse caso os valores de corrente e tensão são valores RMS, ou seja valores médios, pois requerem um tempo médio para as medidas dos sinais da tensão e corrente.

Esses valores médios não são os sinais mais convenientes para monitoração e diagnóstico, pois o maior interesse está nos valores instantâneos da medida da tensão e corrente.

Para a potência instantânea, a equação é dada por:

$$P = u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot i_2 + u_3 \cdot i_3 \quad (4)$$

Onde u_i e i_i são valores instantâneo da tensão e corrente da fase i .

Portanto, a análise da assinatura da potência elétrica do motor obtida durante a movimentação de abertura e fechamento da válvula, constitui a base da monitoração e diagnóstico das condições operacionais elétricas e mecânicas de válvulas moto-operadas, aplicada no desenvolvimento da presente tese.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de monitoração e diagnóstico está dividido principalmente em três partes, conforme apresentado na Figura 9.

A primeira parte consiste no sistema de medida e processamento dos sinais.

A segunda parte é formada pela base de dados.

A terceira parte, que é o núcleo do sistema, constitui a análise dos sinais de potência através da aplicação de duas metodologias: sistema especialista com implementação da lógica nebulosa e a aplicação da transformada de wavelet.

Finalmente o sistema fornece o resultado do diagnóstico através de relatórios e gráficos.

Todo sistema de análise foi desenvolvido e implementado na plataforma MATLAB^{48/}, VERSÃO 5.3, que é uma linguagem de computação de alto nível de desempenho, integrando de forma eficiente e flexível os ambientes de programação e visualização.

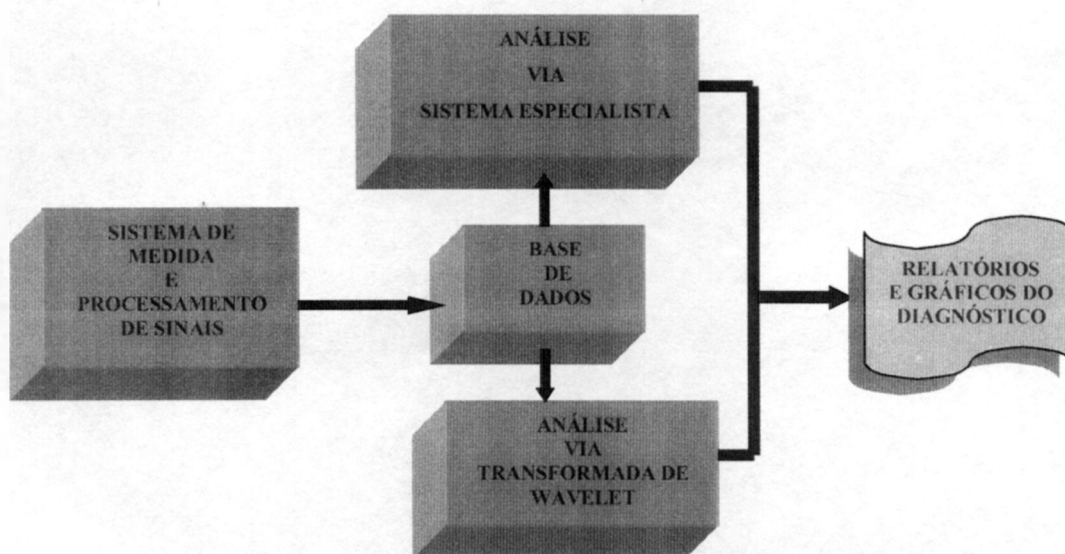


FIGURA 9: Diagrama de blocos do sistema de monitoração e diagnóstico.

5.1 SISTEMA DE MEDIDA E PROCESSAMENTO DE SINAIS

O sistema de medida consiste na aquisição dos sinais de corrente e tensão das fases de alimentação do motor da válvula, obtendo a assinatura de potência.

Esses sinais são obtidos diretamente no centro de controle de motores (CCM), passando por um condicionador de sinais constituído de amplificadores isoladores, transdutores e conversores.

Os sinais são obtidos durante a movimentação de abertura e fechamento da válvula e armazenados no computador de aquisição de dados, para posteriormente serem analisados.

A Figura 10 apresenta o sistema de medida e processamento dos sinais.

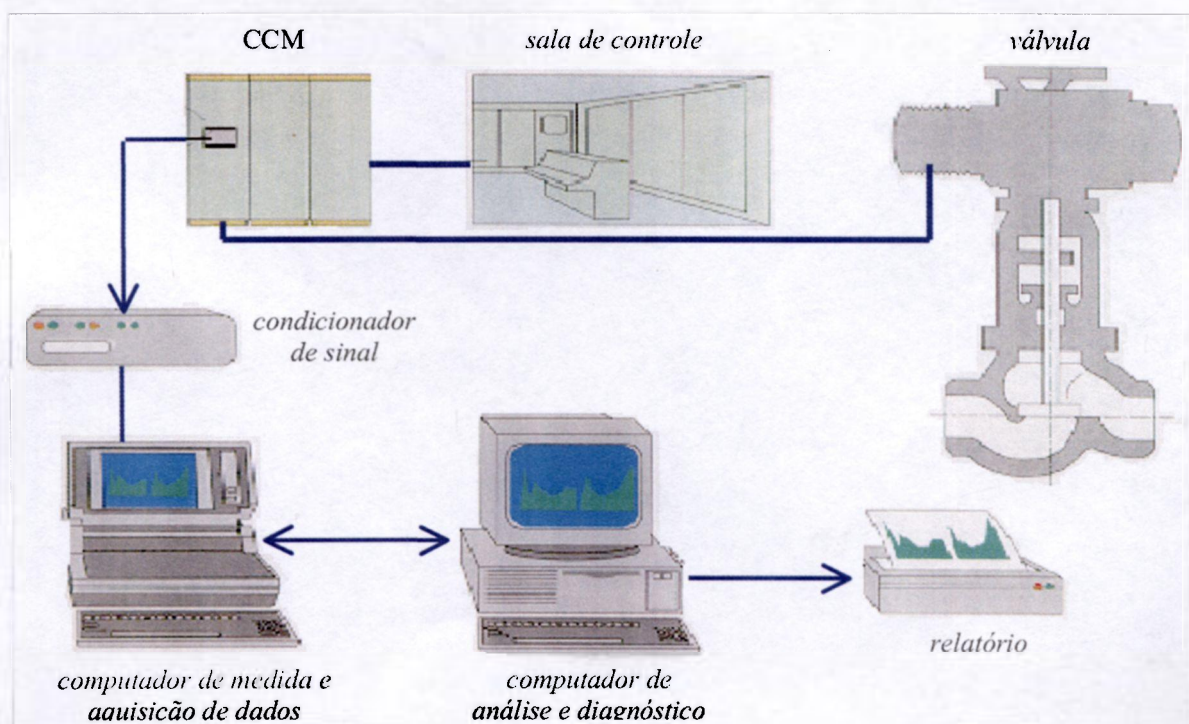


FIGURA 10: Sistema de medida e processamento de sinais.

5.2 BASE DE DADOS

O sistema de monitoração e diagnóstico aplicado a válvulas moto-operadas foi desenvolvido utilizando a base de dados (TAB.1) com sinais padrões (referências), dados com causas e efeitos de falhas obtidos em bancadas experimentais e dados simulados.

A base de dados foi obtida do Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade do Tennessee, como parte do acordo bilateral Brasil/CNPq/IPEN e EUA/NSF/UT (National Science Foundation/University of Tennessee), dentro do Programa Especial de Cooperação Internacional (PECI), sob N. 910005/98-2.

Foram utilizadas válvulas moto-operadas *Westinghouse* do tipo gaveta e globo com atuadores *Limitorque* modelo SMB-000.

Dados simulando falhas, em vários níveis, foram gerados a partir dos dados reais das situações padrões e situações de falha.

Os dados simulados foram necessários para averiguações dos resultados fornecidos pelo sistema de monitoração e diagnóstico desenvolvido, envolvendo situações intermediárias, ou seja, condições que estejam entre a falha real e a condição em que não haja falha, chamada de condição de referência ou condição padrão, reproduzindo desta maneira casos de falhas em situações incipientes.

Os dados simulados foram gerados a partir de um programa desenvolvido em EXCEL, onde se faz uma regressão percentual dos valores das magnitudes das potência em função do tempo nos instantes em que as medidas obtidas apresentam significativas descontinuidades.

A Tabela 1, a seguir, apresenta a base de dados utilizada neste trabalho, que consiste em 25 arquivos de dados de assinaturas de potência, organizados pelos nomes dos arquivos, a origem (real-UT ou simulado), o ciclo (abertura ou fechamento da válvula) e a condição de operação em que o dado foi adquirido (padrão ou referência, falhas devido a desajustes das chaves limite e torque, falhas mecânicas devido a obstrução na movimentação da haste e desgastes de engrenagens e falha elétrica).

TABELA 1: Base de dados.

ARQUIVO	ORIGEM	CICLO	CONDIÇÃO
UT1BLCO	U.T.	abertura	padrão
UT1BLOC	U.T.	fechamento	padrão
UT1MLSCO	U.T.	abertura	desajuste chave limite
UT1MLSS1CO	simulado	abertura	desajuste chave limite
UT1MLSS2CO	simulado	abertura	desajuste chave limite
UT1MTSOC	U.T.	fechamento	desajuste chave de torque
UT1MTSS1OC	simulado	fechamento	desajuste chave de torque
UT1MTSS2OC	simulado	fechamento	desajuste chave de torque
UT1OBSOC	U.T.	fechamento	obstrução na sede
UT2BLOC	U.T.	fechamento	padrão
UT2MTSOC	U.T.	fechamento	desajuste chave de torque
UT2MTSS1OC	simulado	fechamento	desajuste chave de torque
UT2MTSS2OC	simulado	fechamento	desajuste chave de torque
UT2BLCO	U.T.	abertura	padrão
UT2MLSCO	U.T.	abertura	desajuste chave limite
UT2MLSS1CO	simulado	abertura	desajuste chave limite
UT2MLSS2CO	simulado	abertura	desajuste chave limite
UT2BBARCO	U.T.	abertura	obstrução da haste
UT2GDEGCO	U.T.	abertura	desgaste de engrenagem
UT2FELETCO	U.T.	abertura	falha elétrica
UT2GDEGsim1	simulado	abertura	desgaste de engrenagem
UT2GDEGsim2	simulado	abertura	desgaste de engrenagem
UT2GDEGsim3	simulado	abertura	desgaste de engrenagem
UT2BBARsim1	simulado	abertura	obstrução da haste
UT2BBARsim2	simulado	abertura	obstrução da haste

5.3 ANÁLISE DOS SINAIS

Para delineamento no desenvolvimento do sistema de monitoração e diagnóstico, a investigação das falhas está direcionada principalmente às falhas de ajustes das chaves limite e torque e situações de desgastes mecânicos e falhas elétricas.

Este enfoque e maior atenção a essas anomalias se dá devido a predominância de tais falhas observadas no estudo realizado pelo *Institute of Nuclear Power Operations (INPO)* conforme descrito no capítulo 4.1.4.

Portanto, o sistema no que diz respeito as metodologias aplicadas para análise dos sinais está dividido da seguinte maneira:

- A análise dos sinais utilizando sistema especialista implementado pela lógica nebulosa:

Tem como objetivo identificar e caracterizar falhas principalmente devido a desajustes da chave de torque e chave limite^{/49/}. Algumas situações de degradações elétricas e mecânicas também foram analisadas via sistema especialista, porém não constituem a principal aplicação do método.

- A análise dos sinais utilizando a transformada de wavelet:

Foi utilizada predominantemente para detecção de falhas provenientes de desgastes mecânicos identificando e caracterizando tais defeitos em situações incipientes^{/50/}.

Toda estrutura de análise com aplicação do sistema especialista, via lógica nebulosa, e aplicação da transformada de wavelet, foi desenvolvida na plataforma MATLAB, e implementadas utilizando os softwares *Fuzzy Logic Toolbox*^{/51/} e *Wavelet Toolbox*^{/52/} da *Math Works, Inc.*

A Figura 11 apresenta o diagrama de blocos da composição do sistema de monitoração e diagnóstico.

A análise via sistema especialista é constituída por etapas, compostas por menus de interface com o usuário, identificação e caracterização de sinais, normalização de parâmetros, aplicação da lógica nebulosa, diagnóstico e relatório final.

Essas etapas foram implementadas através dos programas computacionais MENUP, NORM_DIAG, DIAG, desenvolvidos na plataforma MATLAB (APÊNDICES A e B).

A aplicação da lógica nebulosa para análise dos sinais foi implementada através do programa FUZZY.FIS, desenvolvido com a utilização do software *FUZZY ToolBox* (APÊNDICE C).

A análise dos sinais via aplicação da transformada discreta de wavelet foi implementada com a aplicação direta do software *WAVELET ToolBox*.

Os capítulos seguintes descrevem detalhadamente as metodologias e a implementação dos métodos utilizados.

5.4 SISTEMA ESPECIALISTA

5.4.1 INTRODUÇÃO

Nos anos 50, os pesquisadores já haviam estabelecido os fundamentos da Inteligência Artificial^{/53/}, incluindo Lógica Matemática e Teoria das Funções Recursivas, guiando a formulação de processamento de listas e da própria linguagem LISP que fornece um interpretador para desenvolver expressões simbólicas recursivas. Tais capacidades suportaram o surgimento de sistemas práticos de computação simbólica.

Ao mesmo tempo, emergiram computadores interativos tornando possíveis ambientes computacionais para desenvolvimento e depuração de programas incrementais.

Nesta mesma ocasião, psicólogos cognitivos - estudantes da forma de pensar humana - criaram caminhos padrões do processo de investigação do raciocínio, modelando o aparente processo de tomada de decisão em termos de regras de produção condicionais.

Nos anos 60, os pesquisadores de Inteligência Artificial tentaram simular o complexo processo do pensamento procurando métodos gerais para resolver uma ampla classe de problemas, entretanto, a despeito de alguns progressos interessantes, as dificuldades eram enormes e não frutificaram.

Durante a década de 70 concentraram esforços em técnicas como *Representação* isto é, modo de formular o problema de maneira a tornar sua solução mais fácil de controlá-la inteligentemente dentro da capacidade de memória do computador. Esta estratégia produziu algum sucesso mas ainda não foi decisiva.

Somente no final da década fizeram a descoberta mais importante: o poder do programa em resolver problemas depende mais do conhecimento que se possui do que do formalismo ou esquema de inferência empregado^{/54/}. Esta realização levou ao desenvolvimento de programas de computador de propósito particular, sistemas que são peritos em alguma área limitada. Estes programas são chamados Sistemas Especialistas.

Portanto, Sistemas Especialistas^{/55/} são sistemas cognitivos desenvolvidos através da Engenharia do Conhecimento, que constitui uma área da Inteligência Artificial, voltada à aplicação do conhecimento para resolver problemas técnicos específicos utilizando métodos inferenciais^{/56/}.

Estes sistemas baseados no conhecimento, construídos principalmente com regras que reproduzem o conhecimento do perito, são utilizados para solucionar determinados problemas em domínios específicos, emitindo uma decisão, apoiada em conhecimento justificado, a partir de uma base de informações, tal qual um especialista de uma determinada área do conhecimento humano.

O conhecimento de um Sistema Especialista^{/57/} consiste em fatos e heurísticas.

Os fatos constituem um corpo de informações que são largamente compartilhadas, publicamente disponíveis e geralmente aceito pelos especialistas em um determinado campo.

As heurísticas são regras privadas de raciocínio plausível e boa conjectura, que caracterizam a tomada de decisão no nível de um especialista da área.

De maneira geral, Sistemas Especialistas são programas de computador que resolvem problemas que os seres humanos resolveriam emulando o raciocínio de um especialista, aplicando conhecimentos específicos e inferências.

O nível de desempenho de um sistema especialista é função principalmente da qualidade do banco de conhecimento que possui.

5.4.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA ESPECIALISTA

Os principais componentes de um sistema especialista^{/58/} estão apresentados na Figura 12.

- *Dispositivo de inferência:*

Trata-se do programa computacional que consiste no processamento de um conjunto de regras que representam o conhecimento do especialista para solução de um determinado problema.

- *Base de conhecimento:*

Consiste na base de dados onde são armazenadas as informações do conhecimento de um especialista necessárias para solução de problemas em um domínio específico.

- *Interface com usuário:*

Trata-se da relação com o usuário onde se dá a inserção e troca de informações no sistema.

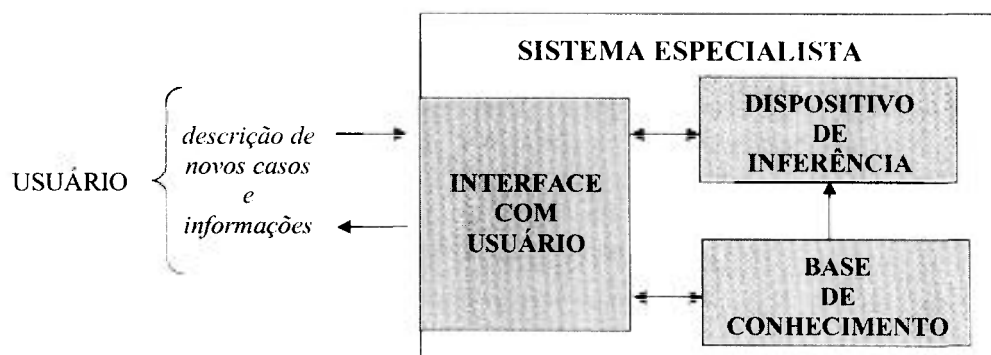


FIGURA 12: Principais componentes do sistema especialista.

5.4.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SISTEMAS ESPECIALISTAS

- Resolvem problemas complexos tão bem quanto ou melhor que especialistas humanos;
- “Raciocinam” heurísticamente, usando o que os peritos consideram efetivamente regras práticas;
- Interagem com usuários utilizando inclusive linguagem natural;
- Manipulam e raciocinam sobre descrições simbólicas;
- Contemplam hipóteses múltiplas simultaneamente;
- Justificam suas conclusões.

5.4.4 CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS

Podemos classificar os sistemas especialistas quanto às características do seu funcionamento⁵⁹. De um modo geral, tais categorias são:

- *Interpretação*: São sistemas que inferem descrições de situações a partir da observação de fatos, fazendo uma análise de dados e procurando determinar as relações e seus significados. Devem considerar as possíveis interpretações, descartando as que se mostrarem inconsistentes.

- *Diagnósticos:* São sistemas que detectam falhas oriundas da análise de dados. A análise dessas falhas pode conduzir à uma conclusão diferente da simples interpretação de dados. Detectam os problemas mascarados por falhas dos equipamentos. Estes sistemas já têm embutido o sistema de interpretação de dados.

- *Monitoramento:* Interpreta as observações de sinais sobre o comportamento monitorado. Tem que verificar continuamente um determinado comportamento em limites pré-estabelecidos, sinalizando quando forem requeridas intervenções para o sucesso da execução. Um sinal poderá ser interpretado de maneiras diferentes, de acordo com a situação global percebida naquele momento, e a interpretação varia de acordo com os fatos que o sistema percebe a cada momento.

- *Predição:* A partir de uma modelagem de dados do passado e do presente, este sistema permite uma determinada previsão do futuro. Ele baseia sua solução na análise do comportamento dos dados recebidos no passado, e tem mecanismos para verificar os vários futuros possíveis, a partir da análise do comportamento desses dados, fazendo uso de raciocínios hipotéticos e verificando a tendência de acordo com a variação dos dados de entrada.

- *Planejamento:* Neste caso, o sistema prepara um programa de iniciativas a serem tomadas para se atingir um determinado objetivo. São estabelecidas etapas e subetapas e, em caso de etapas conflitantes, são definidas as prioridades. Possui características parecidas com o sistema para a predição e normalmente opera em problemas de grande porte e de solução complexa. O princípio de funcionamento, em alguns casos, é por tentativas de soluções, cabendo a análise mais profunda ao especialista que trabalha com esse sistema. Enfoca os aspectos mais importantes e divide de maneira coerente um problema em sub-

problemas menos complexos, estabelecendo sempre o relacionamento entre as metas destes subproblemas e a meta principal.

- *Projeto:* Este sistema tem características parecidas com as características do planejamento, e devem confeccionar especificações tais que sejam atendidos os objetivos dos requisitos particulares. É um sistema capaz de justificar a alternativa tomada para o projeto final, e de fazer uso dessa justificativa para alternativas futuras.

- *Depuração:* Trata-se de sistemas que possuem mecanismos para fornecerem soluções para o mau funcionamento provocado por distorções de dados. Provê, de maneira automática, verificações nas diversas partes, incluindo mecanismos para ir validando cada etapa necessária em um processo qualquer.

- *Reparo:* Este sistema desenvolve e executa planos para administrar os reparos verificados na etapa de diagnóstico. Um sistema especialista para reparos segue um plano para administrar alguma solução encontrada em uma etapa do diagnóstico. São poucos os sistemas desenvolvidos, porque o ato de executar um conserto em alguma coisa do mundo real é uma tarefa complexa.

- *Instrução:* O sistema de instrução tem um mecanismo para verificar e corrigir o comportamento do aprendizado dos estudantes. Normalmente, incorporam como subsistemas um sistema de diagnóstico e de reparo, e tomam por base uma descrição hipotética do conhecimento do aluno. Seu funcionamento consiste em ir interagindo com o treinando, em alguns casos apresentando uma pequena explicação e, a partir daí, ir sugerindo situações para serem analisadas pelo treinando. Dependendo do comportamento deste, se vai aumentando a

complexidade das situações e encaminhando o assunto, de maneira didática, até o nível intelectual do treinamento.

- *Controle*: É um sistema que governa o comportamento geral de outros sistemas (não apenas de computação). É o mais completo, de um modo geral, pois deve interpretar os fatos de uma situação atual, verificando os dados passados e fazendo uma predição do futuro. Apresenta os diagnósticos de possíveis problemas, formulando um plano ótimo para sua correção. Este plano de correção é executado e monitorado para que o objetivo seja alcançado.

O trabalho desenvolvido na presente tese envolve as questões de monitoração e diagnóstico utilizando Sistemas Especialistas.

A estrutura conceitual do sistema está baseada na aplicação da Lógica Nebulosa, também chamada de Lógica Difusa ou Lógica Fuzzy (*"Fuzzy Logic"*).

O próximo capítulo apresenta a metodologia e a implementação da Lógica Nebulosa.

5.5 LÓGICA NEBULOSA

5.5.1 INTRODUÇÃO

A lógica digital convencional trata variáveis assumindo apenas dois possíveis estados: falso ou verdadeiro. Em boa parte dos casos, essa representação é suficiente, mas há situações em que desejamos valores intermediários. Poderíamos usar valores analógicos, mas neste caso cairíamos em equações matemáticas complexas, que nem sempre chegariam ao resultado esperado.

Neste ponto é que aparece a lógica nebulosa ou lógica difusa, que expressa exatamente os valores com que trabalha.

Os próximos parágrafos descrevem um breve histórico sobre como surgiu a lógica nebulosa, suas aplicações e uma comparação da lógica clássica com a lógica nebulosa.

O conceito de conjunto nebuloso foi introduzido, em 1965, por Lotfi A. Zadeh^{/60,61/}.

A ele é atribuído o reconhecimento de grande colaborador do Controle Moderno.

Em meados da década de 60, o Prof. Zadeh observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica computacional fundamentada na lógica booleana.

Procurando solucionar esses problemas, o Prof. Zadeh publicou em 1965 um artigo^{/62/} resumindo os conceitos dos conjuntos nebulosos, revolucionando o assunto com a criação de sistemas nebulosos ou sistemas difusos.

Em 1974, o Prof. Mamdani, do *Queen Mary College*, Universidade de Londres, após inúmeras tentativas frustradas em controlar uma máquina a vapor com tipos distintos de controladores, somente conseguiu fazê-lo através da aplicação do raciocínio nebuloso.

Esse sucesso serviu para estimular outras aplicações, como em 1980, no controle nebuloso de operação de um forno de cimento. Vieram em seguida, várias outras aplicações, destacando-se, por exemplo, os controladores nebulosos de plantas industriais, refinarias,

processos biológicos e químicos, trocador de calor, máquina diesel, tratamento de água e sistema de operação automática de trens.

O desenvolvimento de técnicas de Inteligência Artificial nos últimos anos, ocupa cada vez mais posição de destaque em pesquisas na área de controle e diagnóstico^{163/} com aplicações diversas nas áreas de engenharia, biomédica, financeira e etc.

Os conjuntos nebulosos constituem uma "ponte" no caminho de aproximar o raciocínio humano ao da lógica executada pela máquina.

Por outro lado, a lógica clássica desenvolvida por Aristóteles, filósofo grego (384-322 a.C.) estabelece um conjunto de regras rígidas para que conclusões possam ser aceitas logicamente válidas. O emprego da lógica de Aristóteles leva a uma linha de raciocínio lógico baseado em premissas e conclusões.

Desde então, a lógica convencional, assim chamada, tem sido binária, isto é, uma declaração é falsa ou verdadeira, não podendo ser ao mesmo tempo parcialmente verdadeira e parcialmente falsa.

A Lógica Nebulosa viola estas suposições. O conceito de dualidade estabelecendo que algo pode e deve coexistir com o seu oposto, faz a lógica difusa parecer natural, até mesmo inevitável.

A lógica de Aristóteles trata com valores "*verdade*" das afirmações, classificando-as como verdadeiras ou falsas.

Não obstante, muitas das experiências humanas não podem ser classificadas simplesmente como verdadeiras ou falsas, sim ou não, branco ou preto. Por exemplo, é aquele homem alto ou baixo? A taxa de risco para aquele empreendimento é grande ou pequena? Um sim ou um não como resposta a estas questões é, na maioria das vezes, incompleta.

Portanto, a diferença básica entre a lógica clássica e a lógica nebulosa é que a lógica convencional trata conceitos como categorias discretas e a lógica nebulosa simultaneamente pode atribuir a um mesmo conceito diversos valores lingüísticos com graus de certeza associados.

Na verdade, entre a certeza de ser e a certeza de não ser, existem inúmeros graus de incerteza.

Contudo, a Lógica Nebulosa, com base na teoria dos conjuntos nebulosos, tem se mostrado mais adequada para tratar imperfeições da informação.

De forma mais objetiva e preliminar, podemos definir Lógica Nebulosa como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores.

A Lógica Nebulosa desenvolvida pelo Prof. Lofti A. Zadeh combina Lógica Multivalorada, Teoria Probabilística e Inteligência Artificial para representar o pensamento humano, ou seja, ligar a lingüística e a inteligência humana, pois muitos conceitos são melhor definidos por palavras do que pela matemática.

5.5.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS E VANTAGENS DA LÓGICA NEBULOSA

Características gerais da Lógica Nebulosa:

- Está baseada em palavras e não em números, ou seja, os valores *verdade* são expressos lingüisticamente. Exemplo: quente, frio, longe, perto, etc;
- Possui vários modificadores de predicado, como por exemplo, muito, pouco, grande, pequeno, médio, etc;
- Faz uso das probabilidades lingüísticas, interpretadas como números nebulosos e manipulados pela sua aritmética;
- Manuseia todos os valores entre 0 e 1, tomando o intervalo apenas como um limite.

Vantagens de utilização da Lógica Nebulosa:

- Requer poucas regras, valores e decisões;
- O uso das variáveis lingüísticas nos deixa mais próximo do pensamento humano;
- Simplifica a aquisição da base do conhecimento;
- Proporciona um rápido protótipo dos sistemas;
- Simplifica a solução de problemas.

5.5.3 CONJUNTO NEBULOSO:

O conceito de conjunto nebuloso aparece como uma tentativa de superar a rigidez da teoria clássica de conjuntos para trabalhar matematicamente com classes nas quais a pertinência de um objeto a uma classe pode ser interpretada como uma questão de grau, isto é, apresenta uma variação gradual.

Se em vez de assumir valores no intervalo discreto “{0,1}” a função de pertinência assumir valores no intervalo contínuo “[0,1]”, então o conjunto “A” denomina-se conjunto nebuloso^{62/}.

Portanto a pertinência “x” a um subconjunto nebuloso “A” de “X” pode ser escrito como:

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1] \quad (5)$$

onde μ_A : grau de pertinência.

Uma interpretação física de grau de pertinência pode ser escrita como, grau de confiança com que uma asseveração vai se cumprir, ou grau de certeza de uma afirmativa.

Conjunto nebuloso “A”, pode ser escrito em pares ordenados, como:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (6)$$

5.5.3.1 PRINCIPAIS OPERAÇÕES ENTRE CONJUNTOS NEBULOSOS:

- **União (\cup):** A união de conjuntos nebulosos definidos no mesmo universo de discurso é um novo conjunto nebuloso com uma função de pertinência que representa o grau máximo de relevância entre cada elemento e o novo conjunto nebuloso. A função de pertinência é representada por:

$$\mu_{\cup}(x) = \mu_1(x) \vee \mu_2(x) \vee \dots \vee \mu_j(x) \quad x \in X \quad (7)$$

onde: X é o universo de discurso e \vee é a operação máximo.

- **Intersecção (\cap):** A intersecção de conjuntos nebulosos definidos no mesmo universo de discurso é um novo conjunto nebuloso com uma função de pertinência que representa o grau mínimo de relevância entre cada elemento e o novo conjunto nebuloso. A função de pertinência é representada por:

$$\mu_{\cap}(x) = \mu_1(x) \wedge \mu_2(x) \wedge \dots \wedge \mu_j(x) \quad x \in X \quad (8)$$

onde: X é o universo de discurso e \wedge é a operação mínimo.

- **Potência:** Um conjunto nebuloso pode ser elevado a potência m elevando a função de pertinência a potência m , onde m é um número real e positivo.

$$\mu(x) = [\mu_1(x)]^m \quad x \in X \quad (9)$$

- **Produto Algébrico:** O produto algébrico de conjuntos nebulosos no mesmo universo de discurso é um novo conjunto nebuloso com função de pertinência no universo X dado por:

$$\mu(x) = \mu_1(x) \cdot \mu_2(x) \dots \mu_j(x) \quad x \in X \quad (10)$$

- **Interpolação:** A interpolação de conjuntos nebulosos no mesmo universo de discurso é um novo conjunto nebuloso com função de pertinência no universo X dado por:

$$\mu(x) = 1/j [\mu_1(x) + \mu_2(x) + \dots + \mu_j(x)] \quad x \in X \quad (11)$$

5.6 SISTEMA ESPECIALISTA IMPLEMENTADO PELA LÓGICA NEBULOSA:

O sistema especialista desenvolvido na presente tese foi implementado utilizando a lógica nebulosa⁶⁴. A Figura 13 apresenta o diagrama de blocos do sistema.



FIGURA 13: Diagrama de blocos do sistema especialista via lógica nebulosa.

A fuzificação consiste em transformar um dado de entrada, ou variável de entrada em grau de pertinência que são valores no intervalo $[0,1]$, de acordo com a função de pertinência adotada.

As funções de pertinência podem assumir diversas formas geométricas como, triangulares, trapezoidais, gaussianas, etc.

A Figura 14 apresenta a fuzificação de uma variável de entrada usando uma função de pertinência triangular.

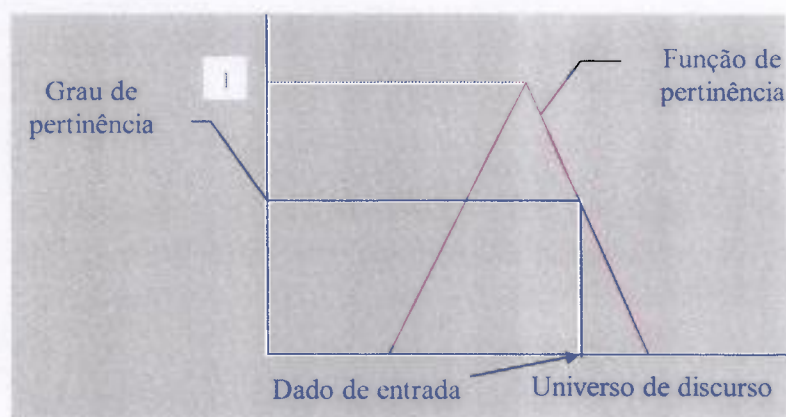


FIGURA 14: Fuzzificação de uma variável de entrada.

O dispositivo de inferência é um algoritmo que consiste no tratamento computacional de um conjunto de “regras” que representam o conhecimento de um especialista⁶⁵.

A base de regras constitui um conjunto de regras linguísticas com a função de obter um objetivo atrelado a um determinado fato.

As descrições linguísticas informais utilizadas pelo ser humano (especialista) no dia a dia é o ponto de partida para o desenvolvimento das regras de inferência. Cada regra é uma proposição condicional nebulosa com uma ou mais cláusulas.

As regras são representações de sistemas desenvolvidos utilizando considerações condicionais de forma canônica da relação entre antecedente e conseqüente do tipo “SE” x é isto “ENTÃO” y é aquilo.

O resultado do processo de inferência constitui na defuzificação obtendo um valor numérico da variável de saída.

Os métodos de defuzificação mais utilizados são^{164/}:

Método da média dos máximos, o qual gera uma ação de controle que representa o valor médio de todas as ações de controle individuais cujas funções de pertinência assumem o valor máximo.

Método do centro de gravidade, a ação de controle numérica é calculada obtendo-se o centro de gravidade da distribuição de possibilidades da ação de controle global (FIG.15).

O método do centro de gravidade é o método utilizado na presente tese.

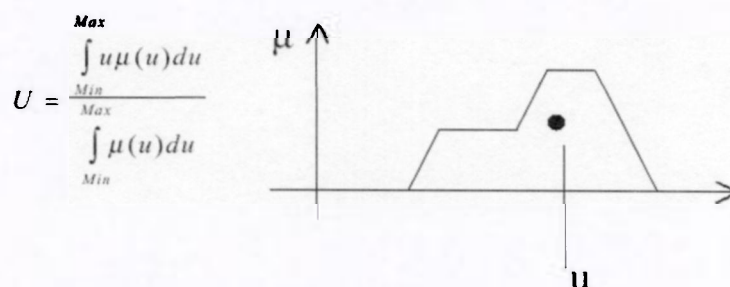


FIGURA 15: Método do centro de gravidade.

A Figura 16 apresenta um exemplo considerando duas variáveis de entrada, duas regras e a defuzificação pelo método do centro de gravidade.

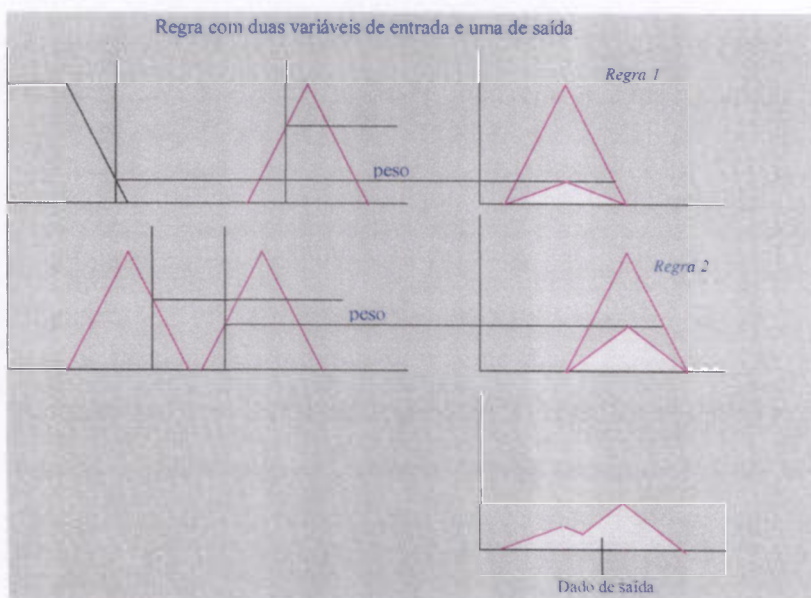


FIGURA 16: Defuzificação por centro de gravidade.

5.6.1 ANÁLISE DOS SINAIS VIA SISTEMA ESPECIALISTA

A assinatura de potência de uma válvula moto-operada é representada pela magnitude da potência ao longo do tempo e é constituída de eventos característicos observados durante os ciclos de abertura e fechamento.

A Figura 17, apresenta a assinatura de potência típica de uma válvula moto-operada durante o ciclo de movimentação de fechamento, destacando alguns eventos característicos deste ciclo. São eles:

- *Pico de comando*: o pico de comando é ocasionado pelo chaveamento de contato do motor quando é acionado o comando de fechamento da válvula;
- *Início da movimentação*: o degrau inicial da assinatura de potência está correlacionado ao início da movimentação das engrenagens da caixa de redução;
- *Degrau de início da movimentação da haste da válvula*: esse degrau caracteriza o início da movimentação da haste da válvula;
- *Pico de acunhamento*: este pico está relacionado ao instante em que o obturador atinge a sede da válvula, ocasionando o aumento da potência de maneira a garantir o fechamento efetivo da válvula.
- *Final da movimentação*: significa o instante de desligamento do motor através da abertura dos contatos da chave de torque, caracterizando o término da movimentação de fechamento da válvula.

A Figura 18, apresenta a assinatura de potência típica de uma válvula moto-operada durante o ciclo de movimentação de abertura com destaque para alguns eventos característicos que ocorrem durante este ciclo. São eles:

- *Pico de comando*: da mesma maneira que ocorre durante o ciclo de fechamento, este pico é ocasionado pelo chaveamento de contato do motor quando é acionado o comando de abertura da válvula;
- *Degrau de início da movimentação*: está correlacionado ao início da movimentação das engrenagens da caixa de redução;

- *Pico de desacunhamento*: este pico está relacionado ao acréscimo da potência necessária para vencer o desacunhamento do obturador na sede da válvula;
- *Degrau final da movimentação*: significa o instante de desligamento do motor através da abertura dos contatos da chave limite, caracterizando o término da movimentação de abertura da válvula.

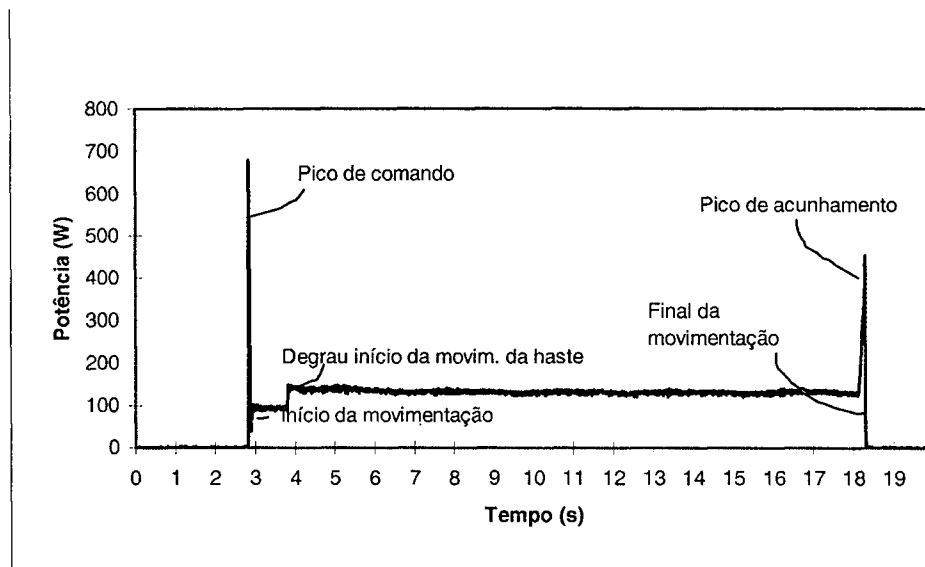


FIGURA 17: Assinatura de potência com eventos característicos do ciclo de fechamento.

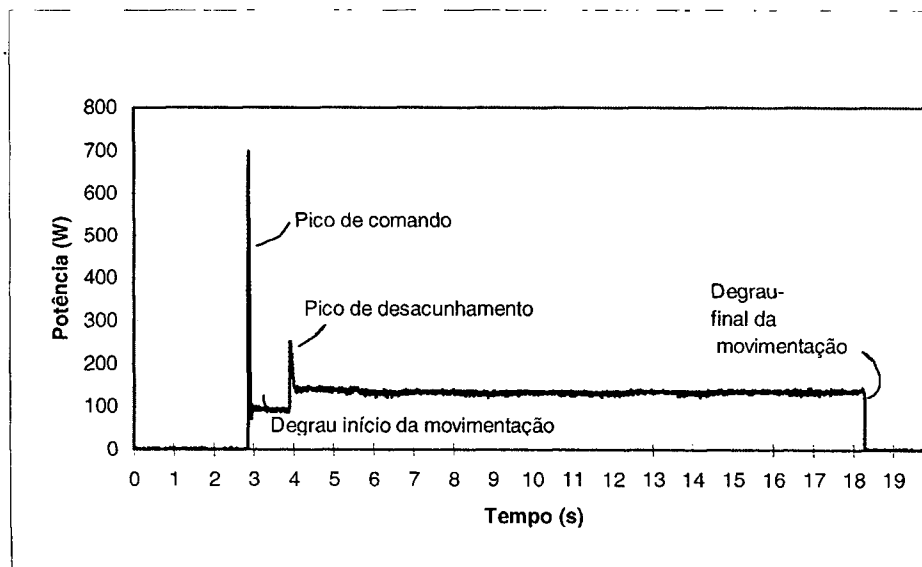


FIGURA 18: Assinatura de potência com eventos característicos do ciclo de abertura.

Na assinatura de potência pode-se identificar formas geométricas, aqui tratadas como sinais primitivos, sendo basicamente picos, degraus e rampas, os quais estão relacionados aos eventos característicos do ciclo de abertura e fechamento da válvula moto-operada. Portanto, a primeira etapa consiste na identificação de tais sinais.

Uma maneira de representar a assinatura de potência é dividir em grupos de sinais que possam ser identificados utilizando algoritmos de reconhecimento padrão.

O principal objetivo do algoritmo é identificar as formas geométricas contidas nas assinaturas de potência.

Portanto, o formato da assinatura pode ser representada como sendo a somatória das formas geométricas ou sinais primitivos.

A assinatura pode ser escrita como sendo:

$$Y = \sum_{i=1}^{N_{\delta}} a_i \delta(t - \tau_{1i}) + \sum_{i=1}^{N_u} b_i u(t - \tau_{2i}) + \sum_{i=1}^{N_r} c_i r(t - \tau_{3i}) + \eta(t) \quad (12)$$

Onde:

$\delta(t), \tau_{1i}$ - componente pico e respectivo tempo,

$u(t), \tau_{2i}$ - componente degrau e respectivo tempo,

$r(t), \tau_{3i}$ - componente rampa e respectivo tempo,

N_{δ}, N_u, N_r - número de picos, degraus e rampas,

$\tau_{1i}, \tau_{2i}, \tau_{3i}$ - instante de tempo do pico, degrau e rampa,

a_i, b_i, c_i - amplitudes do pico, degrau e rampa,

$\eta(t)$ - ruídos randômicos.

Os principais componentes dos sinais primitivos estão apresentados na Figura 19.

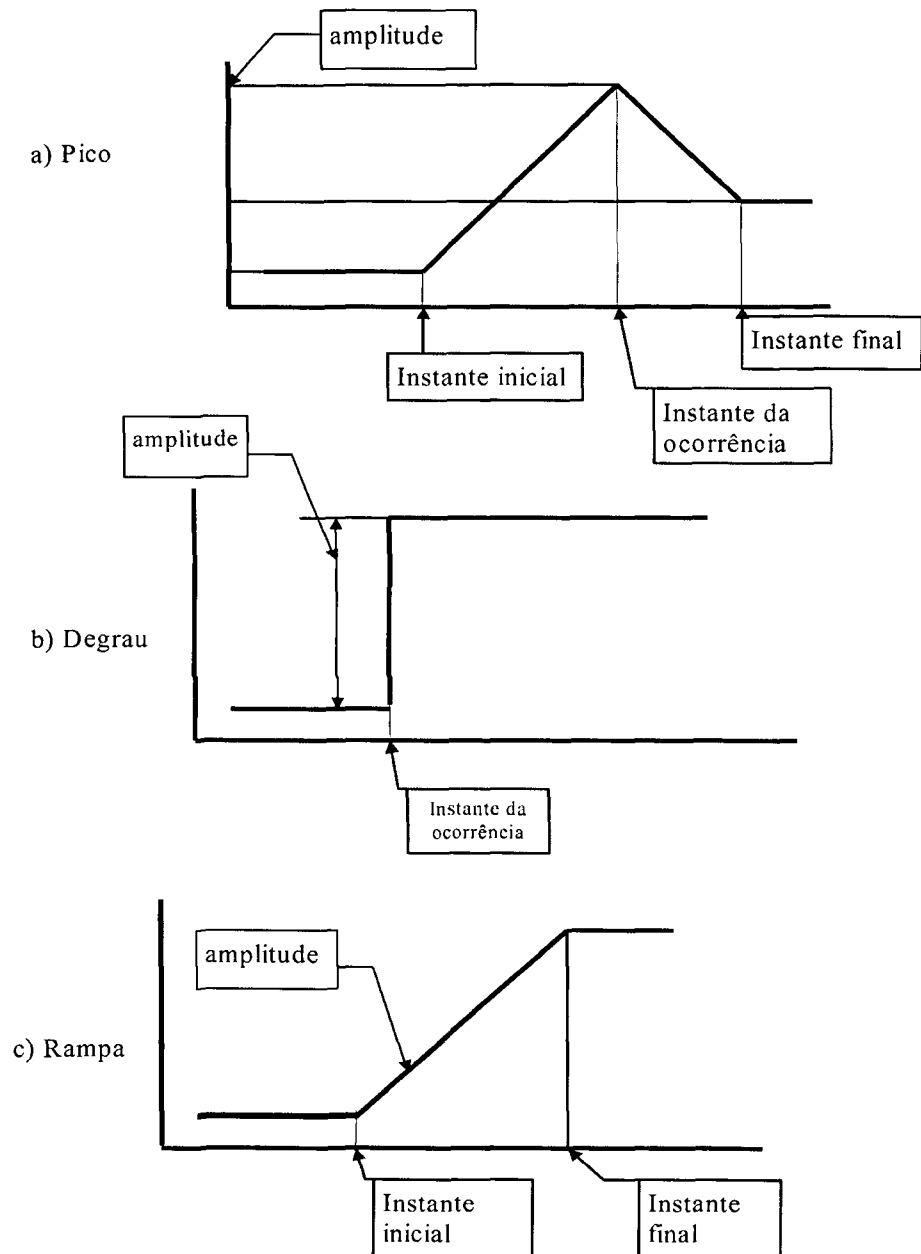


FIGURA 19: Principais componentes dos sinais primitivos (a, b, c).

Para identificação dos sinais primitivos e posteriormente a correlação dos eventos característicos, foi desenvolvido um programa computacional "MENUP" (APÊNDICE A) baseado na concepção do algoritmo de Love e Simaan^{166/} que constitui em uma associação de filtros (FIG.20).

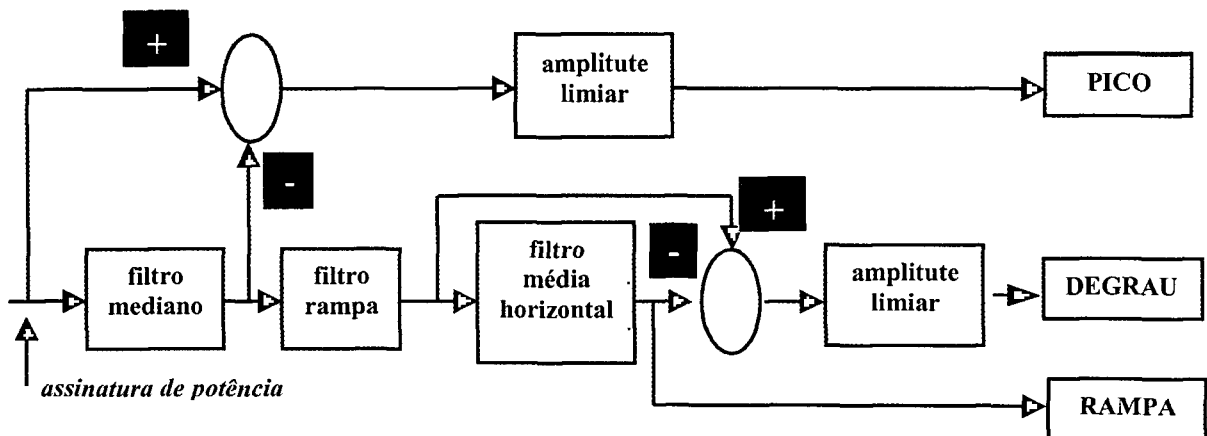


FIGURA 20: Diagrama de blocos do algoritmo de extração dos sinais primitivos.

- **DETECÇÃO DE PICO:**

O filtro mediano substitui uma amostra do sinal que contém um determinado número de pontos pelo valor mediano da amostra. A saída do filtro pode ser escrita como:

$$Y(i) = \text{mediano} \{ y(j); j \in N(i) \} \quad (13)$$

Onde a janela $N(i)$ é definida como:

$$N(i) = \{i-i_1 \dots i \dots i+i_2\} \quad (14)$$

A operação que consiste em computar a diferença do sinal de entrada menos o sinal de saída do filtro mediano, com o estabelecimento de uma amplitude limiar, gera a detecção da ocorrência de picos no sinal amostrado.

- **DETECÇÃO DE DEGRAU E RAMPA:**

Degaus e rampas são detectados usando a combinação do filtro rampa e o filtro de média horizontal.

O filtro rampa opera na saída do filtro mediano. A rampa é determinada pelo ajuste dos mínimos quadrados das amostras nas vizinhanças imediatas $N(i)$ de todo sinal amostrado. A ocorrência de degraus no sinal amostrado são transformados em impulsos e rampas são transformadas em segmentos contínuos positivos ou contínuos negativos.

O filtro de média horizontal opera na saída do filtro rampa. O propósito é extrair os segmentos contínuos positivos ou segmentos contínuos negativos do seu sinal de entrada.

Tais segmentos correspondem às rampas no sinal original amostrado.

A Figura 21 ilustra, através de um sinal de teste, as etapas de operação do módulo de extração dos sinais primitivos, picos, degraus e rampas.

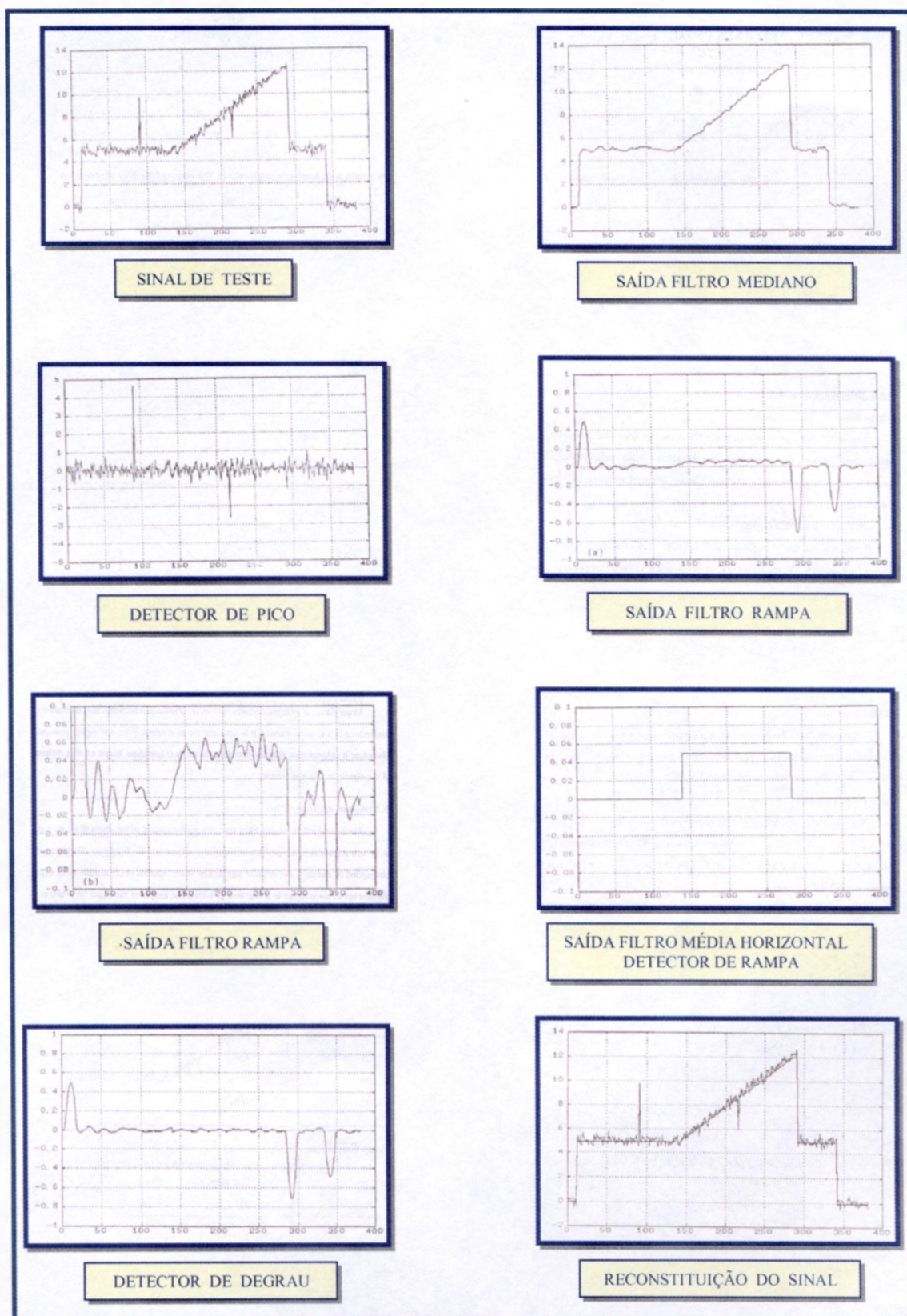


FIGURA 21: Etapas do algoritmo de extração dos sinais primitivos.

Uma vez identificados os sinais primitivos: picos, degraus e rampas, a próxima etapa consiste em correlacioná-los aos eventos característicos existentes durante a movimentação de abertura e fechamento através de regras (“se” e “então”). Tais eventos característicos serão os parâmetros de análise do sistema especialista implementado através da lógica nebulosa.

A Figura 22 apresenta graficamente os dados de saída do módulo de extração de eventos, os parâmetros de análise no ciclo de abertura (1 a 6) e no ciclo de fechamento (1 a 8).

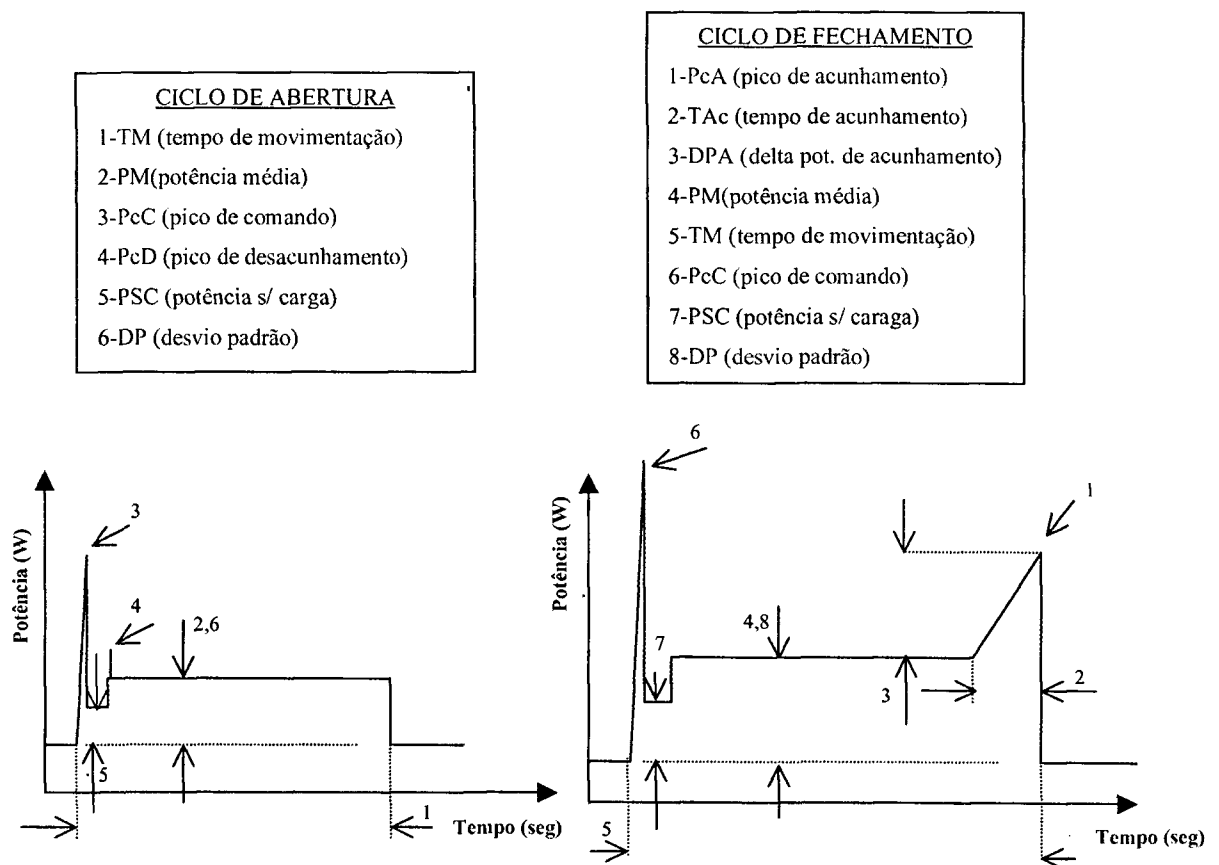


FIGURA 22: Assinaturas de potência com os eventos característicos.

A Figura 23 apresenta os parâmetros de saída do módulo de extração de eventos que compõem as variáveis a serem analisadas pelo sistema especialista através da implementação da lógica nebulosa. São eles:

- Ciclo de abertura:
 TM (tempo de movimentação), PM (potência média), PcC (pico de comando), PcD (pico de desacunhamento), PSC (potência sem carga), DP (desvio padrão);
- Ciclo de fechamento:
 PcA (pico de acunhamento), TAc (tempo de acunhamento), DPA (delta potência de acunhamento), PM (potência média), TM (tempo de movimentação), PcC (pico de comando), PSC (potência sem carga), DP (desvio padrão).

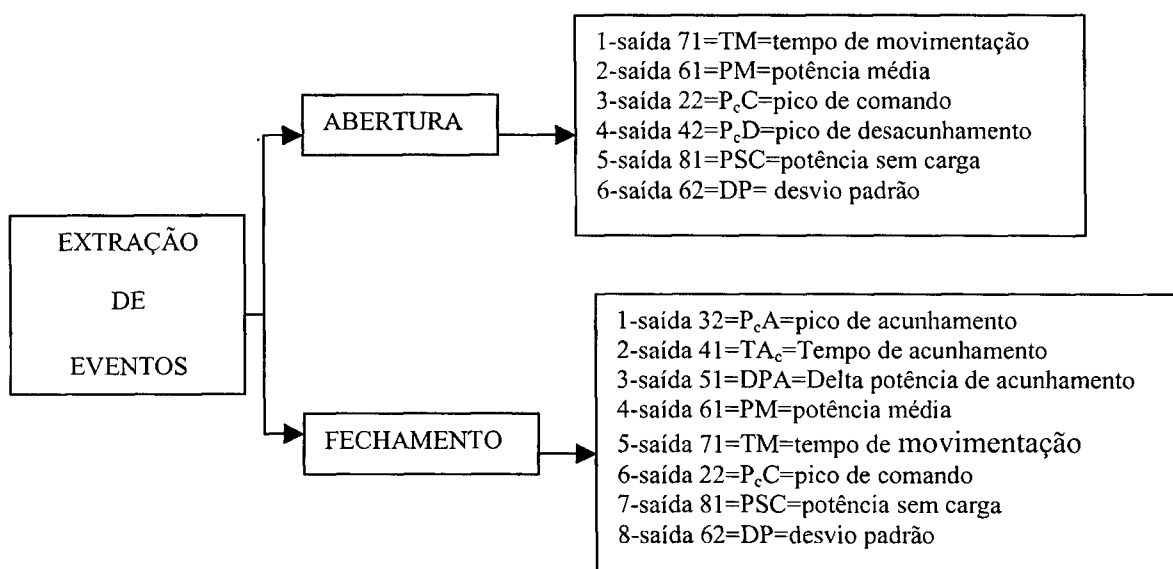


FIGURA 23: Parâmetros de saída do módulo de extração de eventos.

A Figura 24 apresenta o diagrama de blocos com as etapas da análise da assinatura de potência via sistema especialista com implementação da lógica nebulosa.

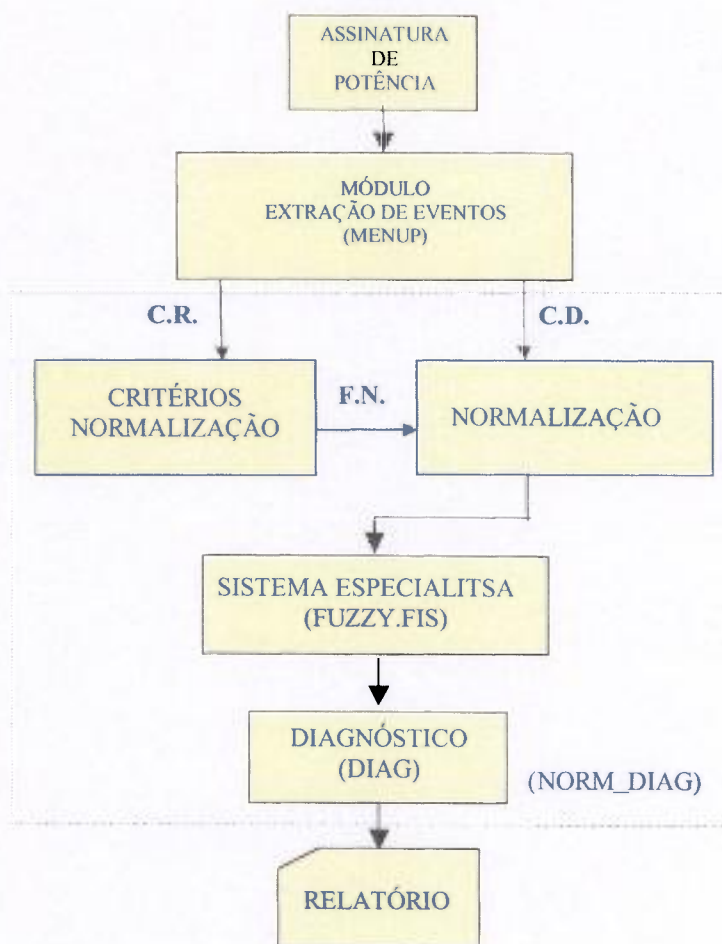


FIGURA 24: Diagrama de blocos da análise via sistema especialista-lógica nebulosa.

Em primeiro lugar, o módulo de extração de eventos (programa MENUP) lê o arquivo que constitui a assinatura de potência, processa o levantamento dos sinais primitivos, correlaciona aos eventos característicos e gera o arquivo de saída com os parâmetros a serem analisados no sistema especialista implementado pela lógica nebulosa.

Esses parâmetros são normalizados via programa computacional “NORM_DIAG” (APÊNDICE B), sendo duas as condições:

- condição de referência (C.R.) onde se tem a assinatura padrão de potência da válvula.
- condição de diagnóstico (C.D.) para todas as assinaturas obtidas posteriormente à situação de referência.

Condição de referência:

Na condição de referência, os valores dos parâmetros dos eventos característicos dos ciclos de abertura e fechamento são normalizados para o valor "5", que significa a condição normal (referência) de operação da válvula.

Esta condição é estabelecida devida as situações distribuídas para o processamento do sistema especialista via lógica nebulosa onde foram adotadas as funções de pertinência do tipo triangular e trapezoidal para as regiões extremas, com o universo de discurso estabelecido entre 0 e 10. Portanto, o valor 5 ocupa a região central que caracteriza a situação normal. Já as situações de falhas podem ocorrer devido aos desvios para ambos os lados, comparando os valores obtidos da condição de diagnóstico com os valores de referência.

A Figura 25 apresenta como exemplo a variável PCA com as funções de pertinência e o universo de discurso adotado no desenvolvimento do sistema.

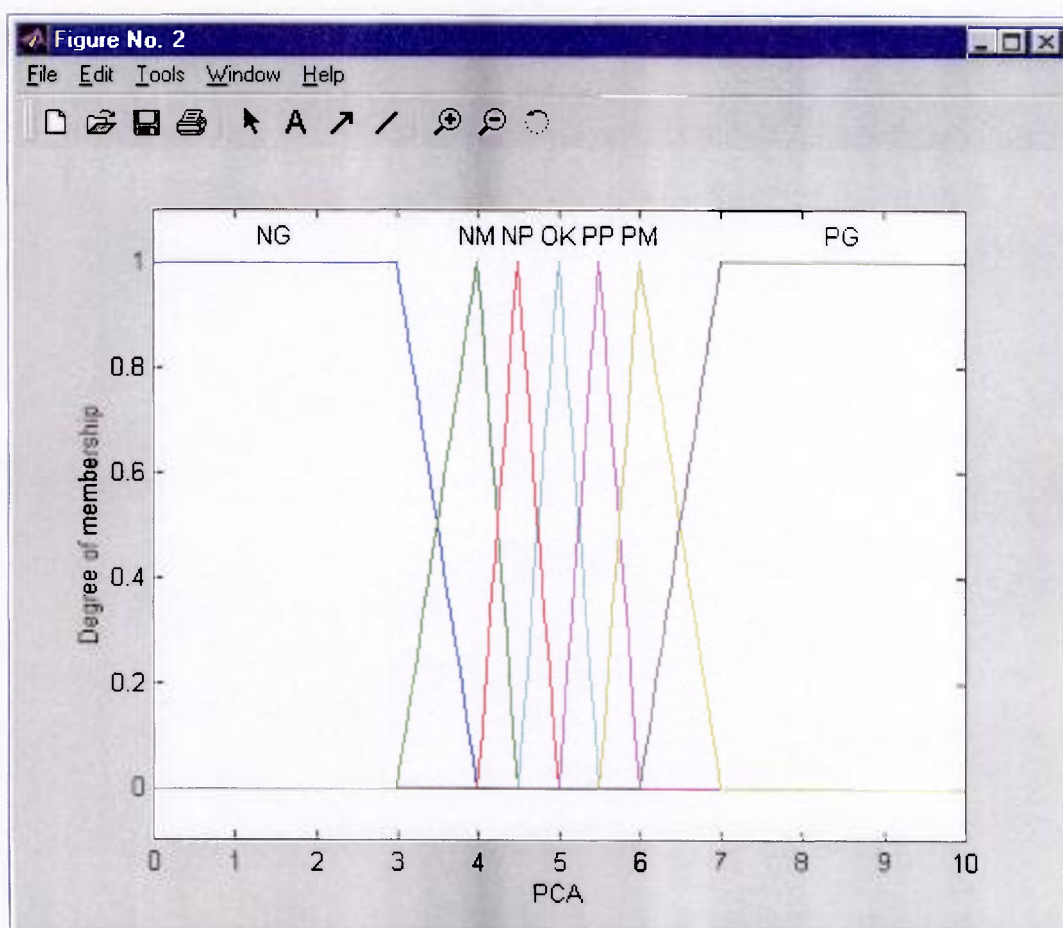


FIGURA 25: Funções de pertinência do sistema.

Portanto, na condição de referência, os fatores de normalização (F.N.) são obtidos da seguinte maneira:

Situação de abertura $FN_i = 5 / \text{saída}_{i\text{-referência na abertura}}$

Situação de fechamento $FN_i = 5 / \text{saída}_{i\text{-referência no fechamento}}$

Condição de diagnóstico:

A normalização dos parâmetros na condição de diagnóstico, ou seja todas as medidas subsequentes às medidas de referência de uma mesma válvula, é obtida multiplicando-se os valores dos parâmetros dos eventos característicos pelos respectivos fatores de normalização (FIG. 26).

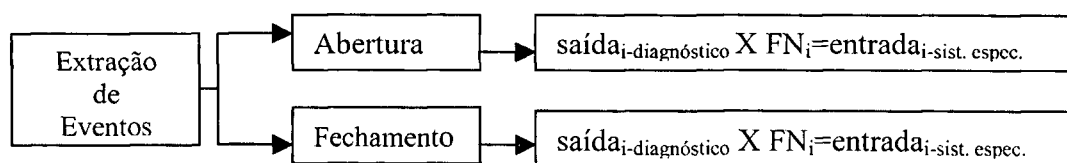


FIGURA 26: Etapas de normalização-condição de diagnóstico.

Terminada a etapa de normalização, inicia-se o processamento do sistema especialista.

A Figura 27 apresenta um quadro geral de todos os parâmetros, ou variáveis (entrada/saída) de análise do sistema especialista para os ciclos de abertura e fechamento.

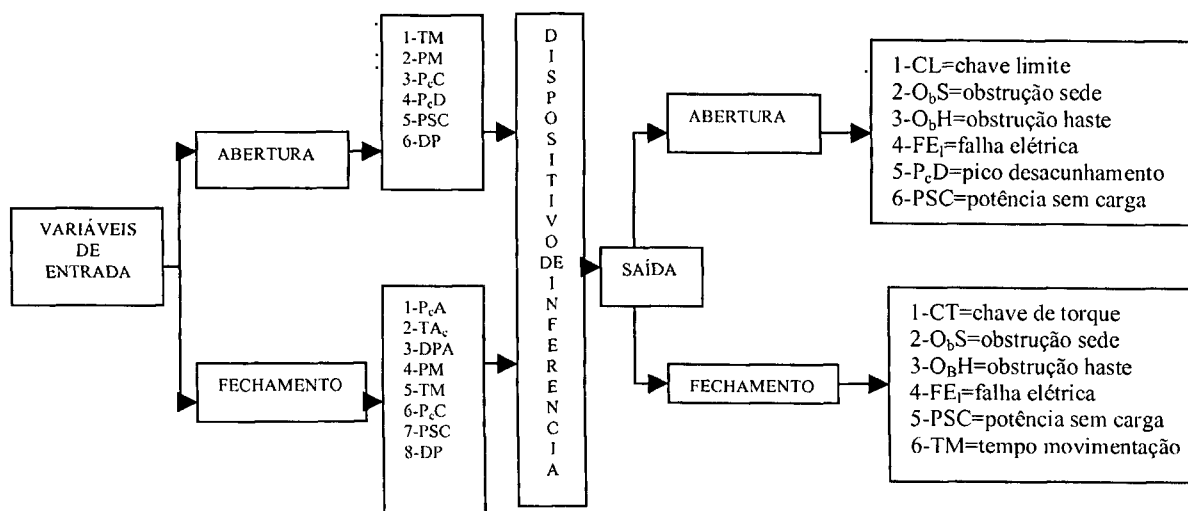


FIGURA 27: Diagrama de blocos com as variáveis de análise do sistema especialista.

As variáveis de saída constituem o objeto de inspeção do diagnóstico.

São elas:

- *Ciclo de abertura:*

CL= desajuste da chave limite

O_bS=obstrução na região da sede

O_bH=obstrução da haste durante a movimentação

FE_f=falha elétrica

P_cD=pico de desacunhamento

PSC=potência sem carga

- *Ciclo de fechamento:*

CT=desajuste da chave de torque

O_bS=obstrução na região da sede

O_BH=obstrução da haste durante a movimentação

FE_f=falha elétrica

PSC=potência sem carga

TM=tempo de movimentação

As variáveis denominadas PSC (potência sem carga), P_cD (pico de desacunhamento) e TM (tempo de movimentação), fazem parte do diagnóstico final mesmo não tendo a relação de falha com causa conhecida. O objetivo consiste em enriquecer o diagnóstico, pois havendo desvios destas variáveis com relação ao valor de referência, é considerada uma situação de falha, porém sem o tipo de degradação que ocasionou tal falha.

O dispositivo de inferência é o programa que faz o processamento computacional das variáveis, baseado em um conjunto de regras que representam o conhecimento de um especialista, proporcionando o diagnóstico de saída. Foi um total de 85 regras sendo, 44 para a condição de abertura e 41 para a condição de fechamento. O sistema especialista foi implementado via lógica nebulosa através do programa FUZZY.FIS, (APÊNDICE C).

A etapa final constitui o diagnóstico. O relatório é obtido via programa DIAG que é uma subrotina do programa NORM_DIAG, onde é realizado o processamento das variáveis de saída do sistema especialista, baseado nas situações apresentadas na (TAB.2).

Os valores das variáveis de saída do sistema especialista estarão sempre entre 0 – 10, devido a distribuição adotada no desenvolvimento das funções de pertinência e o universo de discurso estabelecido (vide FIG.25).

TABELA 2: Situações do diagnóstico.

SITUAÇÃO NORMAL	$4.5 \leq \text{variáveis de saída} \leq 5.5$
SITUAÇÃO ALERTA	$4.0 \leq \text{variáveis de saída} < 4.5$ $5.5 < \text{variáveis de saída} \leq 6.0$
SITUAÇÃO ATENÇÃO	$6.0 < \text{variáveis de saída} \leq 7.0$ $3.0 \leq \text{variáveis de saída} < 4.0$
SITUAÇÃO EMERGÊNCIA	$7.0 < \text{variáveis de saída} < 3.0$

5.6.1.1 TELAS DOS PROGRAMAS DE ANÁLISE VIA SISTEMA ESPECIALISTA

A Figura 28 apresenta a tela do módulo de extração de eventos que consiste na primeira etapa da análise via sistema especialista.

Em primeiro lugar, carrega-se o arquivo com os dados da assinatura de potência, verificando-se o gráfico da assinatura original do sinal, seleciona-se o levantamento dos eventos característicos escolhendo-se o ciclo, abertura ou fechamento.

Em seguida, o programa fornece os valores dos parâmetros que constituem os eventos característicos da assinatura de potência a serem analisados.

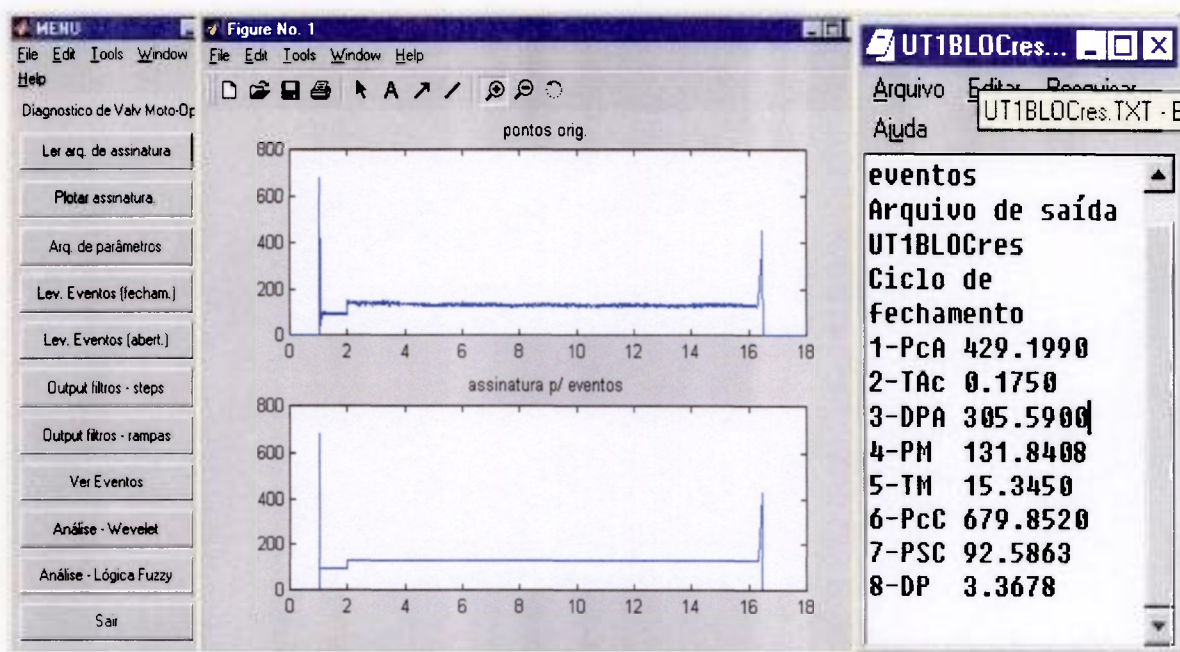


FIGURA 28: Tela do módulo de extração de eventos (ciclo fechamento).

Posteriormente, é executada a etapa de normalização. Caso a assinatura seja da condição de referência (C.R.), o programa calcula os fatores de normalização (F.N.). Caso contrário, o programa normaliza os parâmetros de saída do módulo de extração de eventos.

A Figura 29 apresenta as telas da etapa de normalização.

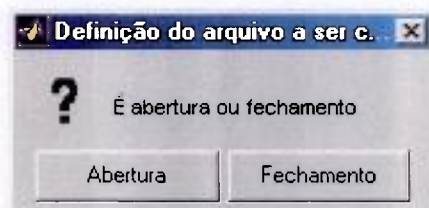
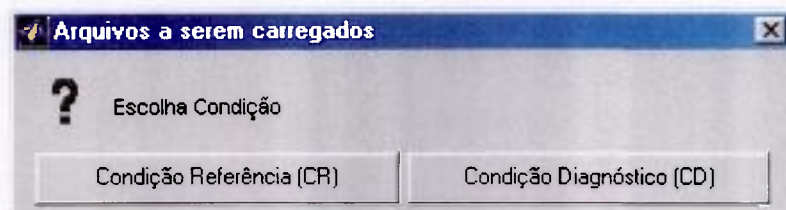


FIGURA 29: Seqüência de telas da etapa de normalização.

O próximo passo consiste em entrar com os valores das variáveis (que constitui o arquivo de saída da etapa de normalização) no sistema especialista. Este processo dá-se autorizando a análise via fuzzy, escolhendo o ciclo de movimentação, abertura ou fechamento, conforme apresentado na Figura 30.

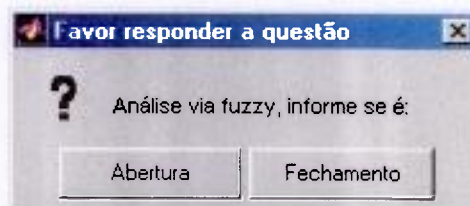


FIGURA 30: Tela de acionamento do comando fuzzy.

A tela seguinte (FIG. 31) apresenta, como exemplo, o sistema fuzzy evidenciando as variáveis de entrada, as variáveis de saída, o método de inferência e o método de defuzificação.

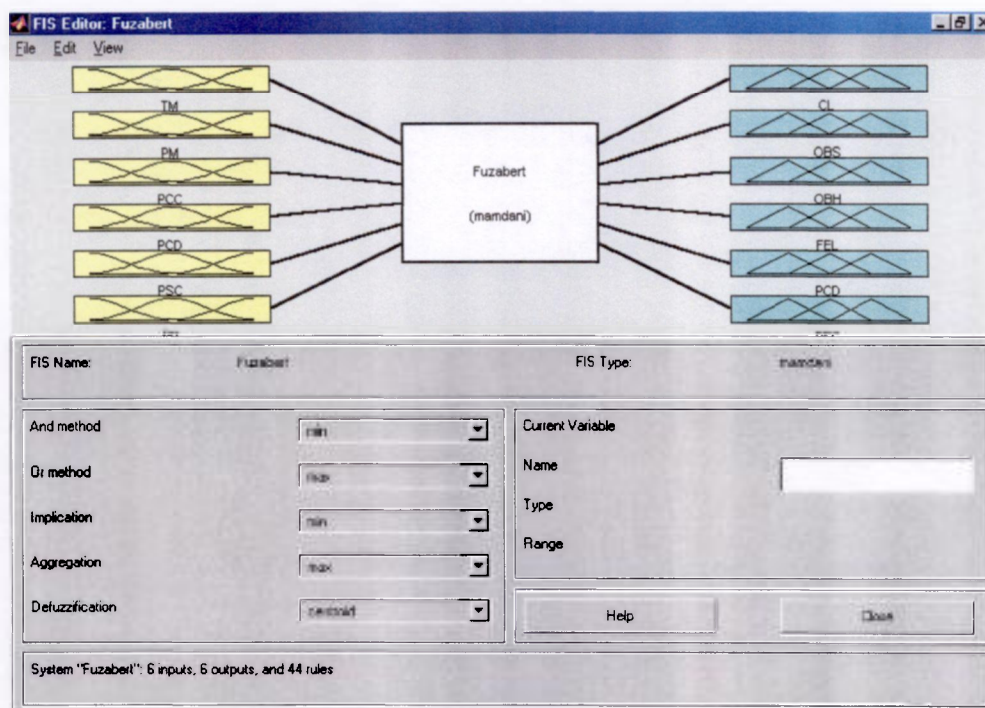


FIGURA 31: Sistema Fuzzy de inferência.

A tela seguinte (FIG. 32) apresenta as variáveis de entrada, as variáveis de saída e as funções de pertinência para o ciclo de abertura, cuja legenda está na Tabela 3.

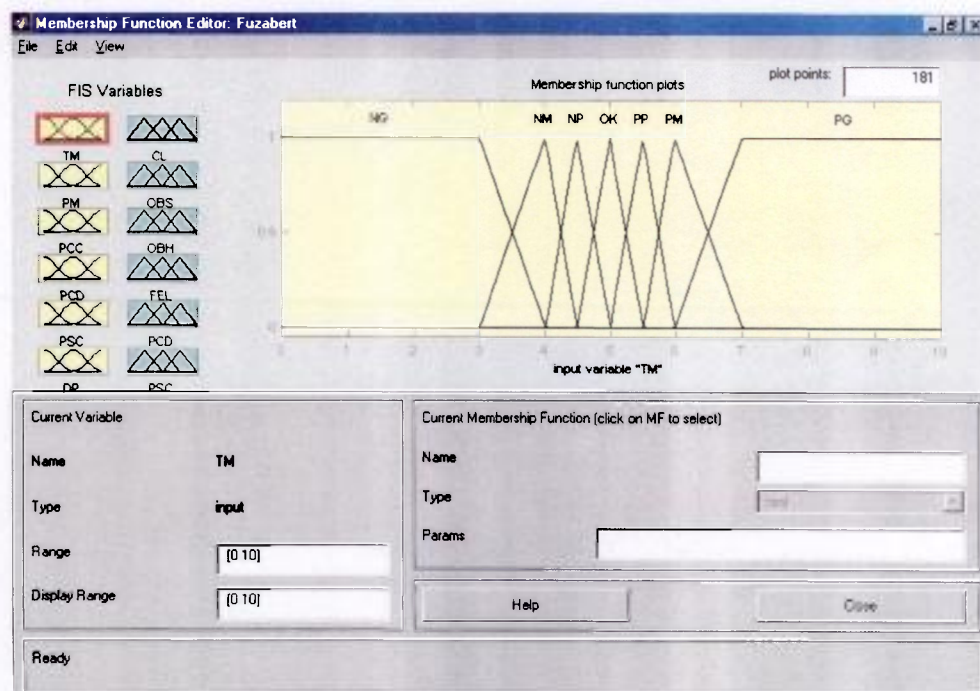


FIGURA 32: Tela com as variáveis de entrada / saída e funções de pertinência.

TABELA 3: Legenda da Figura 32.

Variáveis de entrada		Variáveis de saída		Funções de pertinência	
TM	tempo de movimentação	CL	chave limite	NG	negativo grande
PM	potência média	OBS	obstrução sede	NM	negativo médio
PCC	pico de comando	OBH	obstrução haste	NP	negativo pequeno
PCD	pico de desacunhamento	FEL	falha elétrica	OK	normal
PSC	potência sem carga	PCD	pico de desacunhamento	PP	positivo pequeno
DP	desvio padrão	PSC	potência sem carga	PM	positivo médio
				PG	positivo grande

A próxima tela (FIG. 33) apresenta um conjunto de regras.

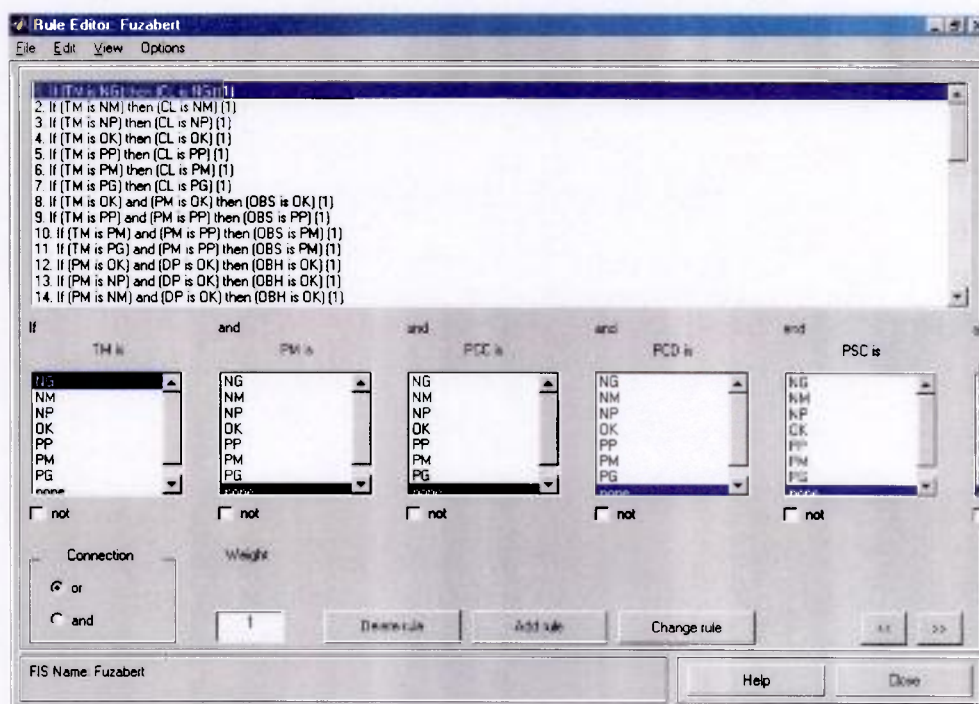


FIGURA 33: Tela com apresentação de um conjunto de regras.

A próxima tela (FIG. 34) apresenta as variáveis de entrada e saída com os respectivos valores.

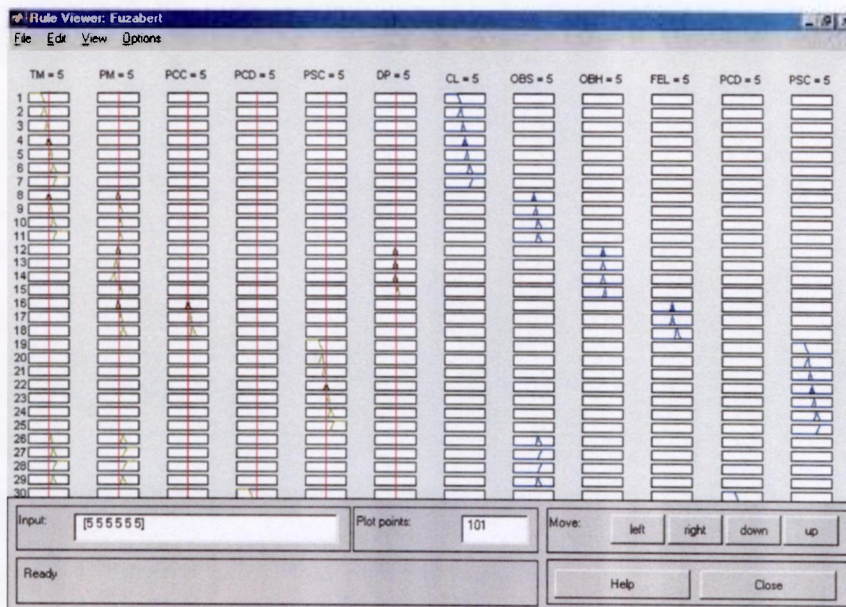


FIGURA 34: Tela com as variáveis de entrada e saída com os respectivos valores.

A etapa final consiste na emissão do relatório de saída do diagnóstico da válvula moto-operada com a análise da assinatura de potência via sistema especialista, como mostrado na Tabela 4.

TABELA 4: Relatório de saída – diagnóstico via sistema especialista.

ARQUIVO: UT1BLCO.PRN – MONITORAÇÃO/DIAGNÓSTICO	
PARÂMETROS DE SAÍDA	SITUAÇÃO
CL=chave limite	normal
O _b S=obstrução sede	normal
O _b H=obstrução haste	normal
FE ₁ =falha elétrica	normal
P _c D=pico desacunhamento	normal
PSC=potência sem carga	normal

5.7 TRANSFORMADA DE WAVELET

A transformada de *wavelet* tem sido aplicada em muitas áreas de pesquisa^{/67,68/} com bastante sucesso, entre elas: análise de impressões digitais, análise de vibrações, banco de filtros de sinais e principalmente processamento de imagem, onde se tem o maior número de aplicações, como exemplo, imagens biomédicas.

A Transformada de *wavelet* consiste em um método de análise de sinais^{/69,70/} que utiliza funções elementares localizadas no tempo e escala.

A transformada contínua de *wavelet* (TCW) relaciona o sinal estudado $s(t)$ com a função elementar, chamada *wavelet* que é uma função real, oscilatória, com conteúdo finito de frequência e de curta duração. A variação de frequência na transformada de *wavelet* é obtida através da sua compressão / expansão do sinal no tempo^{/71/}. A função $\psi(x)$ caracteriza a *wavelet* “mãe” e é dada por:

$$\Psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right); \text{ onde } a,b \in \mathbf{R}; a \neq 0 \quad (15)$$

Uma série de funções derivadas da *wavelet* mãe são geradas a partir da variação dos parâmetros “ a ” e “ b ”, onde “ a ” representa a escala e “ b ” define a translação no tempo.

A transformada contínua de *wavelet* de uma função $f \in L^2(\mathbf{R})$, ou seja, funções que satisfazem a condição de energia finita, ($\int |f(t)|^2 dt < \infty$), é dada pela seguinte expressão:

$$W_{a,b}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \Psi_{a,b}(x) dx \quad (16)$$

A transformada contínua de *wavelet* pode ser representada graficamente em um plano tempo-escala, como apresentado na Figura 35.

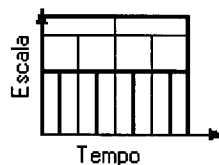


FIGURA 35: Plano tempo-escala (wavelet).

As Figuras 36 e 37 mostram os efeitos de dilatação e translação da TCW.



FIGURA 36: Efeito da variação do valor da escala (parâmetro “ a ”).

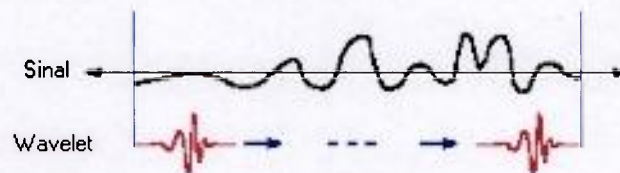


FIGURA 37: Deslocamento contínuo da *wavelet* no tempo (parâmetro “ b ”).

A transformada contínua de *wavelet* é uma representação redundante, ou seja, o deslocamento da *wavelet* no domínio do tempo é contínuo, ao longo de todo o domínio temporal do sinal. Com isto, o cálculo computacional para a transformada contínua de *wavelet* é bastante dispendioso.

Uma possibilidade que tem sido explorada é a utilização da transformada de *wavelet* contínua numa versão amostrada, onde são utilizados apenas determinados valores para os parâmetros “ a ” e “ b ”, diminuindo ou eliminando a redundância.

Escolhendo-se adequadamente os parâmetros “ a ” e “ b ”, pode-se definir uma família de “*wavelets*” transladadas e escaladas no tempo tal que ainda seja possível recuperar o sinal completamente, de forma mais simples, eficiente e compacta com menor custo computacional.

Com este objetivo, a transformada contínua de *wavelet* é amostrada escolhendo-se valores de escalas e posições (parâmetros “ a ” e “ b ”) baseados em potência de dois, conforme equações (17) e (18).

$$a=2^j \text{ e } b=k2^j \text{ onde } j,k \in \mathbb{R} \quad (17)$$

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}x - k) \quad (18)$$

onde: $\Psi_{j,k}(x)$ são versões dilatadas e transladadas da *wavelet* mãe $\Psi(x)$.

Portanto é possível representar as funções em termos de *wavelets* como:

$$f(x) = \sum_j \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(x) \quad (19)$$

onde:

$$d_{j,k} = \int f(x) \psi_{j,k}(x) dx \quad (20)$$

A versão amostrada da transformada contínua de *wavelet*, como definida nas equações (19) e (20) é denominada transformada discreta de *wavelet* (TDW) ou “*discrete wavelet transform*” (DWT). A Figura 38 apresenta uma ilustração do processo de dilatação/compressão e o deslocamento da transformada discreta de *wavelet*.

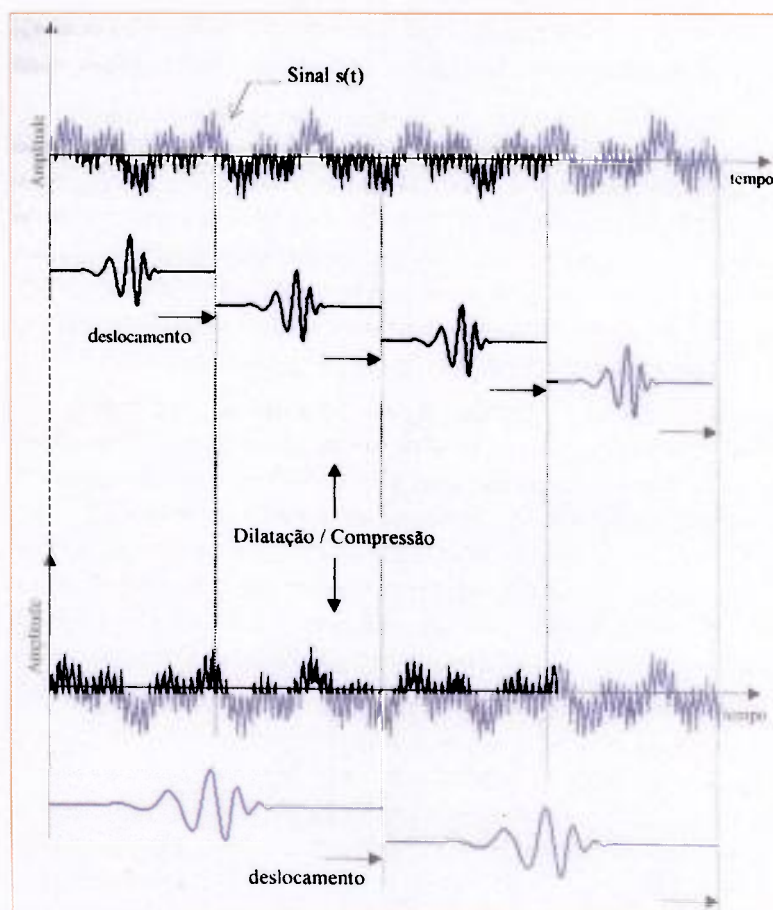


FIGURA 38: Dilatação/compressão e deslocamento da transformada discreta de *wavelet*.

A transformada de *wavelet* decompõe o sinal amostrado em faixas de frequências que podem variar através da compressão / expansão do sinal no tempo.

As Figuras 39 e 40 ilustram a decomposição de um sinal através do bloco básico de decomposição do algoritmo de Mallat⁷². Neste processo, o sinal original S passa através de filtros complementares H e L , passa alta e passa baixa respectivamente. Destes filtros emergem dois sinais com o mesmo número de amostras que S . Após a operação “*downsampling*”⁷³, que consiste em desprezar cada segunda amostra da sequência, tem origem os sinais cA e cD , que são os coeficientes de aproximação e coeficientes de detalhe da transformada discreta de wavelet (TDW). O filtro passa baixa L tem o efeito de “suavizar” o sinal, gerando o que é denominado de *aproximação do sinal*. O filtro passa alta retém a parte de alta frequência que é denominada de *detalhe do sinal*.

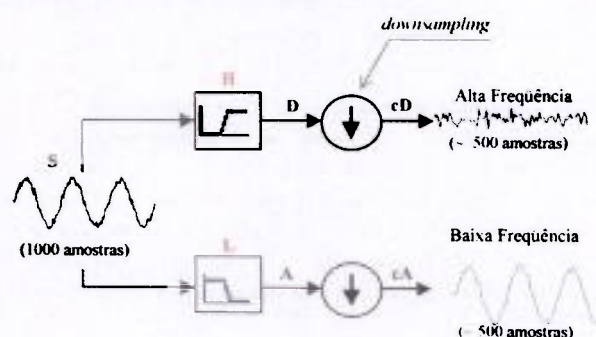


FIGURA 39: Bloco básico de decomposição do sinal.

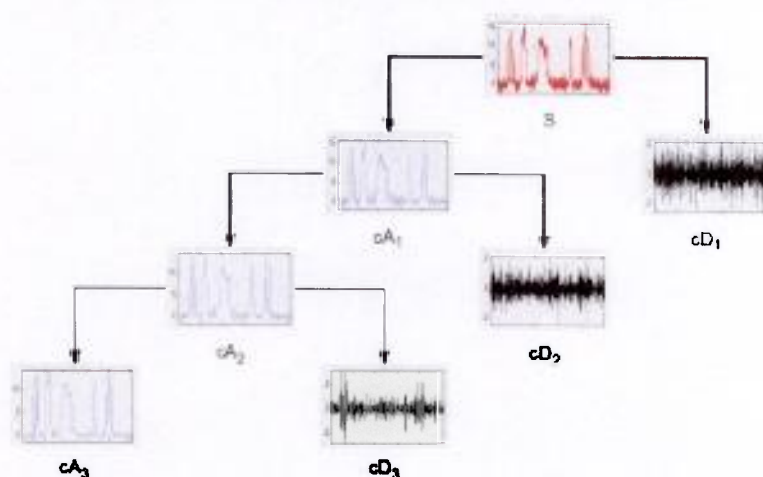


FIGURA 40: Decomposição do sinal em árvore.

5.7.1 FUNÇÕES DE WAVELET

Existem diversas funções de wavelets ou famílias de wavelets.

A escolha da wavelet depende do objetivo do processamento do sinal. Não existem regras, porém o mais indicado é encontrar a função mais adequada para comparar às componentes locais de interesse do sinal amostrado.

Inúmeros autores têm desenvolvidos funções de wavelets com propriedades especiais que as fazem adequadas para aplicação em diferentes campos. As funções principais são^{73/}: Haar, Daubechies, Morlet, Mexican Hat, Meyer, Biorthogonal, Coiflets, Symlets.

A Figura 41 apresenta algumas funções aqui mencionadas.

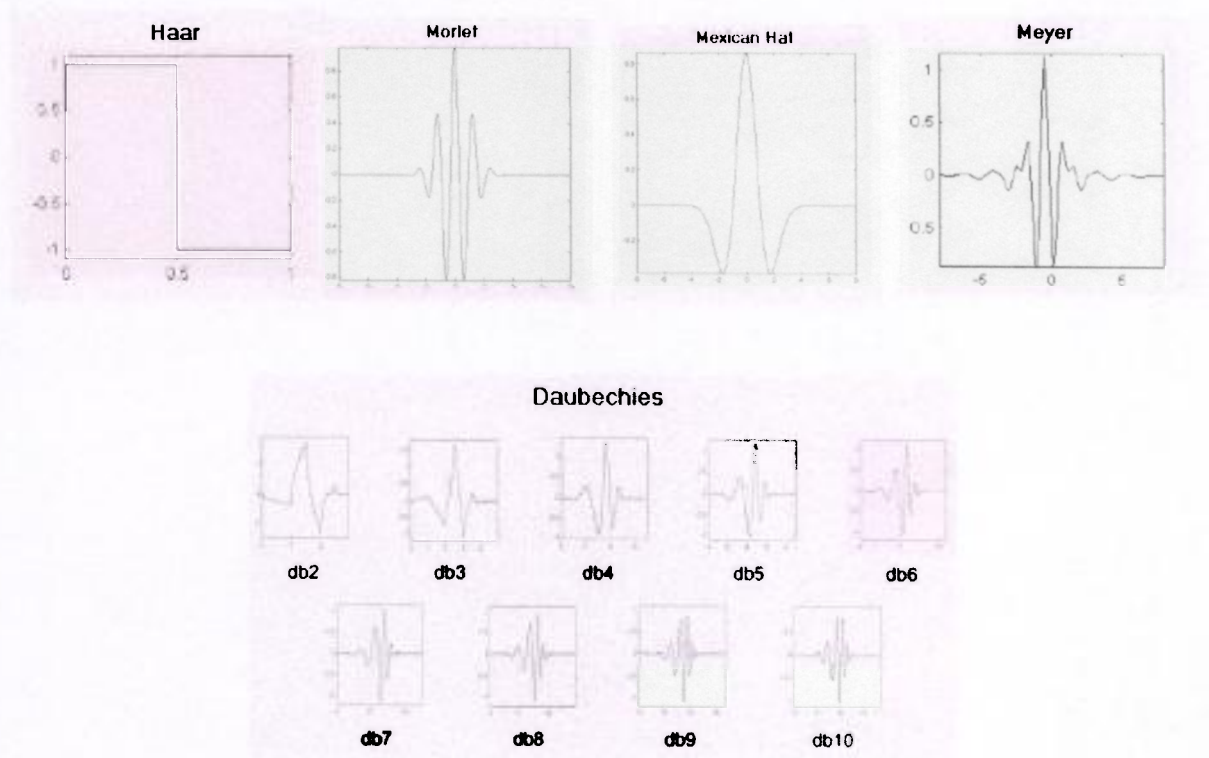


FIGURA 41 : Apresentação de algumas funções wavelets.

5.7.2 ANÁLISE DOS SINAIS VIA TRANSFORMADA DISCRETA DE WAVELET

A análise dos sinais das assinaturas de potência com aplicação da transformada de *wavelet*, tem como objetivo principal a identificação e caracterização de falhas mecânicas em situações incipientes, com objetivo de detectar anomalias em curto período de tempo, ou seja transientes, analisando os sinais em situações não estacionárias.

A técnica de análise de sinais apresentada anteriormente foi implementada para a análise de um determinado grupo de sinais que contém falhas mecânicas devido a desgastes de engrenagens e falhas de obstrução da haste da válvula devido a envergamento.

Para proceder a implementação desta técnica, foram utilizadas as facilidades de análise e programação oferecidas pelo MATLAB através do software *Wavelet Toolbox*, onde várias famílias de *wavelets* estão disponíveis, permitindo a exploração dos resultados das análises de forma muito eficiente.

A escolha da melhor *wavelet* a ser usada para análise de um determinado sinal é um tópico de muita discussão, pois não há nenhuma regra geral para escolha da mesma. O que ocorre, é mais uma questão de bom senso e experiência que se vai adquirindo à medida que mais e mais experimentos, utilizando as várias possibilidades, vão sendo realizados.

Alguns aspectos básicos podem ser observados para uma aproximação da melhor escolha, como a similaridade do sinal com determinada *wavelet* além das irregularidades presentes no sinal amostrado.

Após vários experimentos, foi escolhida para análise a *wavelet Daubechies* “db4” com nível de decomposição “6”, pois a partir desse nível o processamento do sinal não apresentava melhora significativa quanto a evidência da falha.

A família de *wavelet Daubechies*^[74] tem-se mostrado uma boa opção para análise, segundo publicações, para identificação de falhas em sinais de vibração e aplicações em processamento de imagens.

As Figuras 42 e 43 apresentam as telas da sequência da análise em caráter ilustrativo, sendo os resultados e discussões apresentados no capítulo 6.

A Figura 42 apresenta o sinal original de falha de obstrução na haste e os sinais de aproximação e detalhe, para aplicação da wavelet Daubechies “db4” e nível de decomposição “6”.

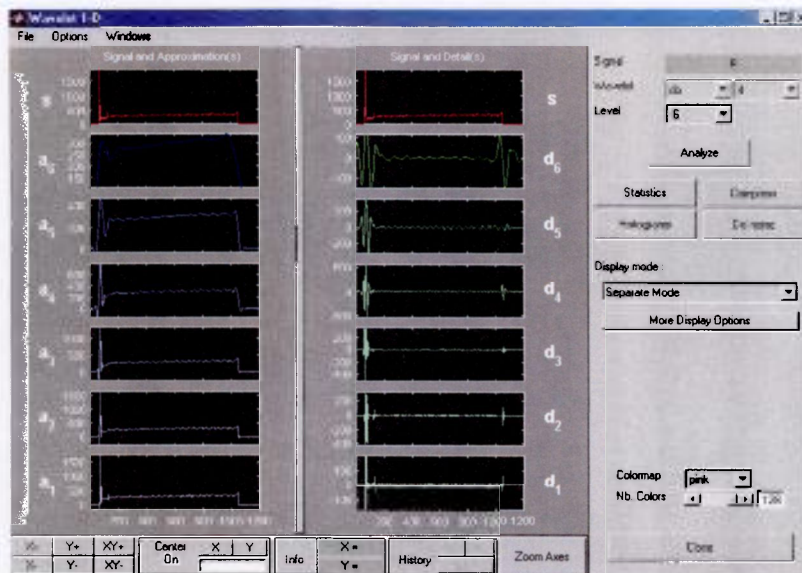


FIGURA 42: Sinal original e sinais de aproximação e detalhe, db4 nível 6.

A Figura 43, apresenta a decomposição em árvore juntamente com o sinal original e o sinal de aproximação nível 6.

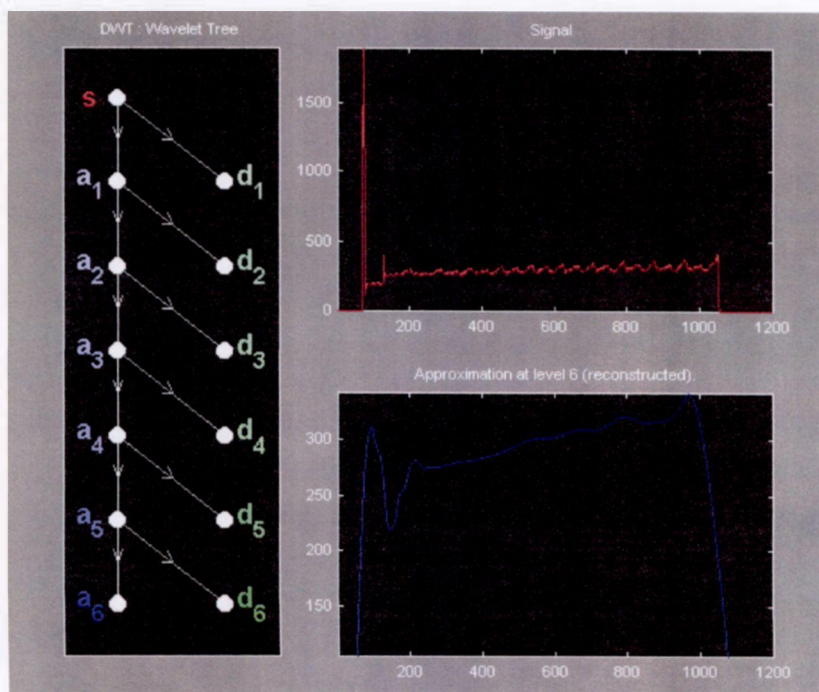


FIGURA 43: Decomposição em árvore e sinais original e aproximação nível 6.

A transformada discreta de wavelet foi utilizada neste trabalho com objetivo principal de obter informações mais detalhadas contidas nos dados medidos através das técnicas de processamento de sinais.

Destaque para aplicação predominantemente de investigação de sinais transientes e detecção de falhas provenientes de desgastes mecânicos, identificando-as e caracterizando tais defeitos em situações incipientes.

Os resultados da aplicação desta técnica estão apresentados no capítulo a seguir.

6 RESULTADOS

6.1 RESULTADOS COM APLICAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA

As Tabelas 5 e 6 apresentam um resumo dos resultados dos casos analisados com aplicação do sistema especialista através da implementação da lógica nebulosa para os ciclos de abertura e fechamento.

Nas tabelas estão apresentados: os arquivos de dados analisados, a relação das variáveis de saída do sistema especialista com os respectivos resultados obtidos, e o diagnóstico contendo a situação operacional da válvula e a degradação correspondente.

Os resultados das variáveis destacados na cor cinza, significam que os mesmos se encontram fora da região dos valores estabelecidos para a condição normal de operação da válvula.

A distribuição das situações operacionais do diagnóstico estabelecidas no presente trabalho encontram-se ilustradas na Figura 44.



FIGURA 44: Ilustração das condições do diagnóstico.

Nas Tabelas 5 e 6 as colunas "DIAGNÓSTICOS" estão divididas em "DEGRADAÇÃO" e "SITUAÇÃO".

A coluna SITUAÇÃO fornece as condições operacionais da válvula, conforme descrito anteriormente, e a coluna DEGRADAÇÃO fornece a mais provável causa ocorrida para a respectiva SITUAÇÃO do diagnóstico.

As Figuras de 45 a 55 apresentam as assinaturas de potência com as respectivas identificações dos arquivos de dados.

As TABELAS de 7 a 17 apresentam as seguintes informações:

- os ciclos de movimentação;
- a identificação dos arquivos de dados;
- as informações do módulo de extração de eventos, contendo: o nome da variável, o valor obtido e o fator de normalização;
- as informações do sistema especialista, contendo: os nomes das variáveis de entrada e saída e os respectivos valores normalizados obtidos;
- os resultados do diagnóstico, contendo: a falha observada e a situação operacional da válvula monitorada.

TABELA 5: Resultados obtidos com análise dos sinais do ciclo de abertura.

CICLO DE ABERTURA DA VÁLVULA								
ARQUIVO ANALISADO	VARIÁVEIS DE SAÍDA						DIAGNÓSTICO	
	CL	O _b S	O _b H	FE _l	P _c D	PSC	DEGRADAÇÃO	SITUAÇÃO
UTIBLCO	5.00	5.00	5.00	5.00	5.01	5.00	-----	padrão
UT1MLSCO	1.74	5.00	5.00	5.00	4.72	5.07	desajuste - chave limite	emergência
UT1MLSS1CO	4.04	5.00	5.00	5.00	4.72	5.07	desajuste - chave limite	alerta
UT1MLSS2CO	3.07	5.00	5.00	5.00	4.72	5.07	desajuste - chave limite	atenção
UT2BLCO	5.00	5.00	5.00	5.00	5.01	5.01	-----	padrão
UT2MLSCO	1.74	5.00	5.00	5.00	5.38	4.74	desajuste - chave limite	emergência
UT2MLSS1CO	4.13	5.00	5.00	5.00	5.38	4.74	desajuste - chave limite	alerta
UT2MLSS2CO	3.59	5.00	5.00	5.00	5.38	4.74	desajuste - chave limite	atenção
UT2FELTCO	5.00	5.00	5.00	7.31	6.01	5.19	falha elétrica	emergência
UT2BBARCO	4.88	5.00	8.16	5.67	5.22	4.95	falha mecânica	emergência

TABELA 6: Resultados obtidos com análise dos sinais do ciclo de fechamento.

CICLO DE FECHAMENTO DA VÁLVULA								
ARQUIVO ANALISADO	VARIÁVEIS DE SAÍDA						DIAGNÓSTICO	
	CT	O _b S	O _b H	FE _l	PSC	TM	DEGRADAÇÃO	SITUAÇÃO
UTIBLOC	5.03	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	-----	padrão
UT1MTSOC	8.26	5.00	5.00	5.00	5.12	5.10	desajuste - chave torque	emergência
UT1MTSS1OC	5.68	5.32	5.00	5.00	5.12	5.10	desajuste - chave torque	alerta
UT1MTSS2OC	6.40	5.32	5.00	5.00	5.12	5.10	desajuste - chave torque	atenção
UT1OBSOC	7.45	8.26	5.00	5.00	4.77	4.99	falha mecânica	emergência
UT2BLOC	5.04	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	-----	padrão
UT2MTSOC	8.26	5.00	5.00	5.00	5.02	5.11	desajuste - chave torque	emergência
UT2MTSS1OC	5.90	5.00	5.00	5.00	5.02	5.11	desajuste - chave torque	alerta
UT2MTSS2OC	6.68	5.02	5.00	5.00	5.02	5.11	desajuste - chave torque	atenção

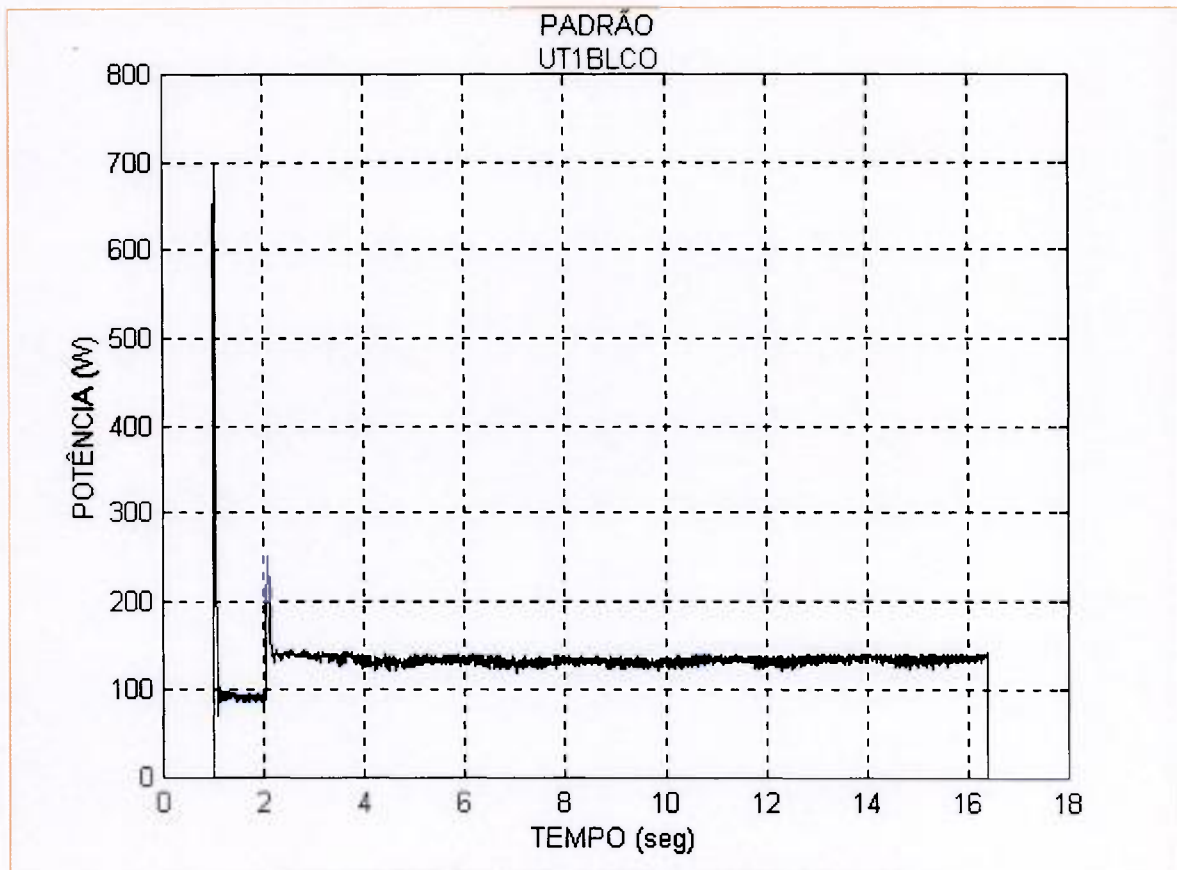


FIGURA 45: Arquivo UT1BLCO – assinatura padrão.

TABELA 7: Arquivo UT1BLCO - RESULTADOS

CICLO DE ABERTURA								
ARQUIVO UT1BLCO (padrão)								
EXTRAÇÃO DE EVENTOS			SISTEMA ESPECIALISTA				DIAGNÓSTICO	
PARÂMETRO DE SAÍDA	VALOR	FATOR DE NORMALIZAÇÃO FN	ENTRADA		SAÍDA		FALHA	SITUAÇÃO
			VARIÁVEL	VALOR	VARIÁVEL	VALOR		
1-TM	15.38000	0.3251	1-TM	5.0000	1-CL	5.00	-----	padrão
2-PM	133.8782	0.0373	2-PM	4.9937	2-O _b S	5.00	-----	padrão
3-P _c C	699.000	0.0072	3-P _c C	5.0328	3-O _b H	5.00	-----	padrão
4-P _c D	251.7970	0.0199	4-P _c D	5.0108	4-FE _l	5.00	-----	padrão
5-PSC	92.1759	0.0542	5-PSC	4.9959	5-P _c D	5.01	-----	padrão
6-DP	3.9773	1.2571	6-DP	4.9999	6-PSC	5.00	-----	padrão

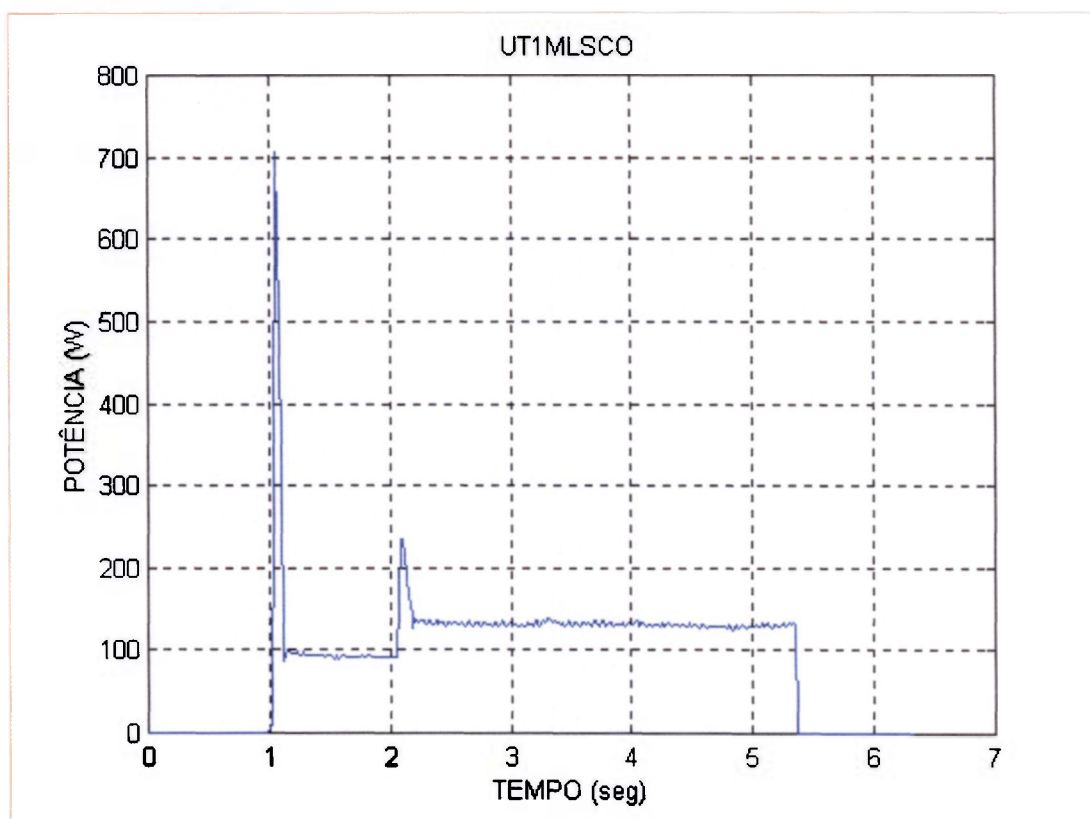


FIGURA 46: Arquivo UT1MLSCO – desajuste chave limite.

TABELA 8: Arquivo UT1MLSCO - RESULTADOS

CICLO DE ABERTURA								
ARQUIVO UT1MLSCO (<i>desajuste chave limite</i>)								
EXTRAÇÃO DE EVENTOS			SISTEMA ESPECIALISTA				DIAGNÓSTICO	
PARÂMETRO DE SAÍDA	VALOR	FATOR DE NORMALIZAÇÃO FN	ENTRADA		SAÍDA		FALHA	SITUAÇÃO
			VARIÁVEL	VALOR	VARIÁVEL	VALOR		
1-TM	4.3200	0.3251	1-TM	1.4044	1-CL	1.74	<i>C.L.</i>	<i>Emerg.</i>
2-PM	132.1668	0.0373	2-PM	4.9298	2-O _b S	5.00	----	OK
3-P _c C	706.8359	0.0072	3-P _c C	5.0892	3-O _b H	5.00	----	OK
4-P _c D	235.7734	0.0199	4-P _c D	4.6919	4-FE ₁	5.00	----	OK
5-PSC	93.3610	0.0542	5-PSC	5.0602	5-P _c D	4.72	----	OK
6-DP	1.8071	1.2571	6-DP	2.2717	6-PSC	5.07	----	OK

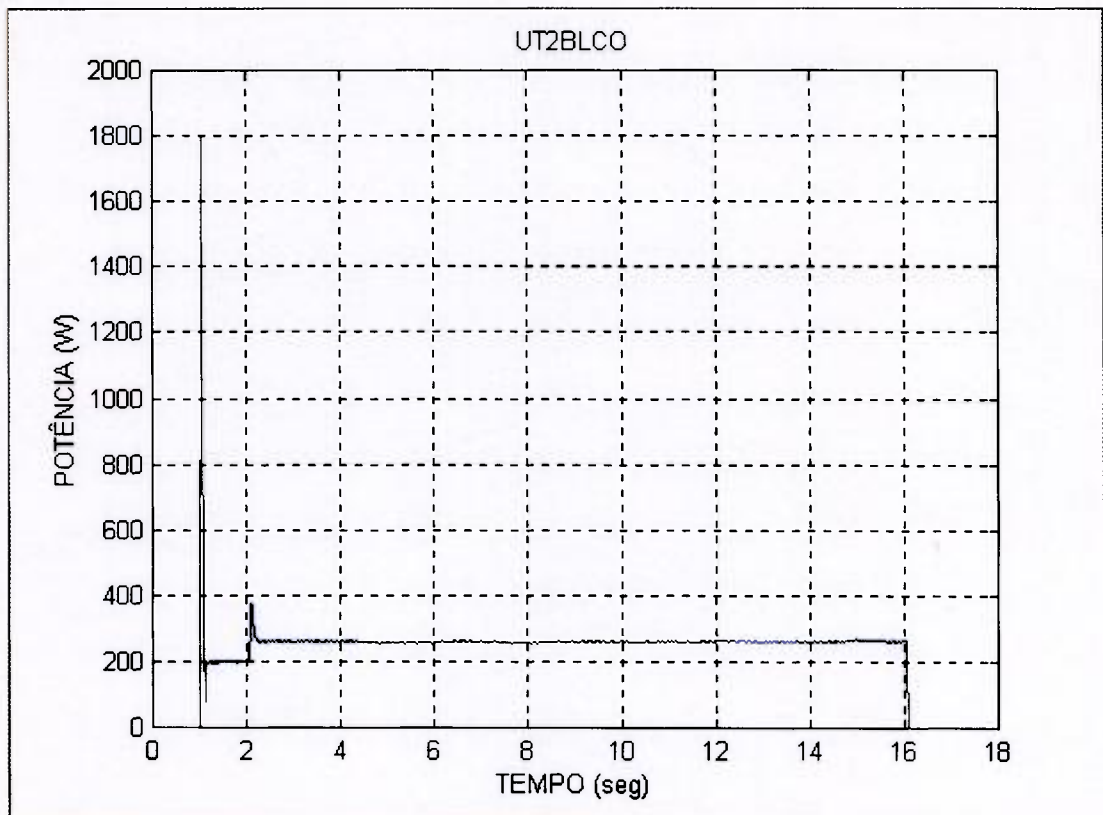


FIGURA 47: Arquivo UT2BLCO - assinatura padrão.

TABELA 9: Arquivo UT2BLCO - RESULTADOS

CICLO DE ABERTURA								
ARQUIVO: UT2BLCO (padrão)								
EXTRAÇÃO DE EVENTOS			SISTEMA ESPECIALISTA				DIAGNÓSTICO	
PARÂMETRO DE SAÍDA	VALOR	FATOR DE NORMALIZAÇÃO FN	ENTRADA		SAÍDA		FALHA	SITUAÇÃO
			VARIÁVEL	VALOR	VARIÁVEL	VALOR		
1-TM	15.0450	0.3323	1-TM	4.9995	1-CL	5.00	-----	padrão
2-PM	259.6610	0.0193	2-PM	5.0114	2-O _b S	5.00	-----	padrão
3-P _c C	1800.5460	0.0028	3-P _c C	5.0415	3-O _b H	5.00	-----	padrão
4-P _c D	376.6172	0.0133	4-P _c D	5.0090	4-FE ₁	5.00	-----	padrão
5-PSC	195.5709	0.0256	5-PSC	5.0092	5-P _c D	5.01	-----	padrão
6-DP	2.2627	2.2097	6-DP	5.0000	6-PSC	5.01	-----	padrão

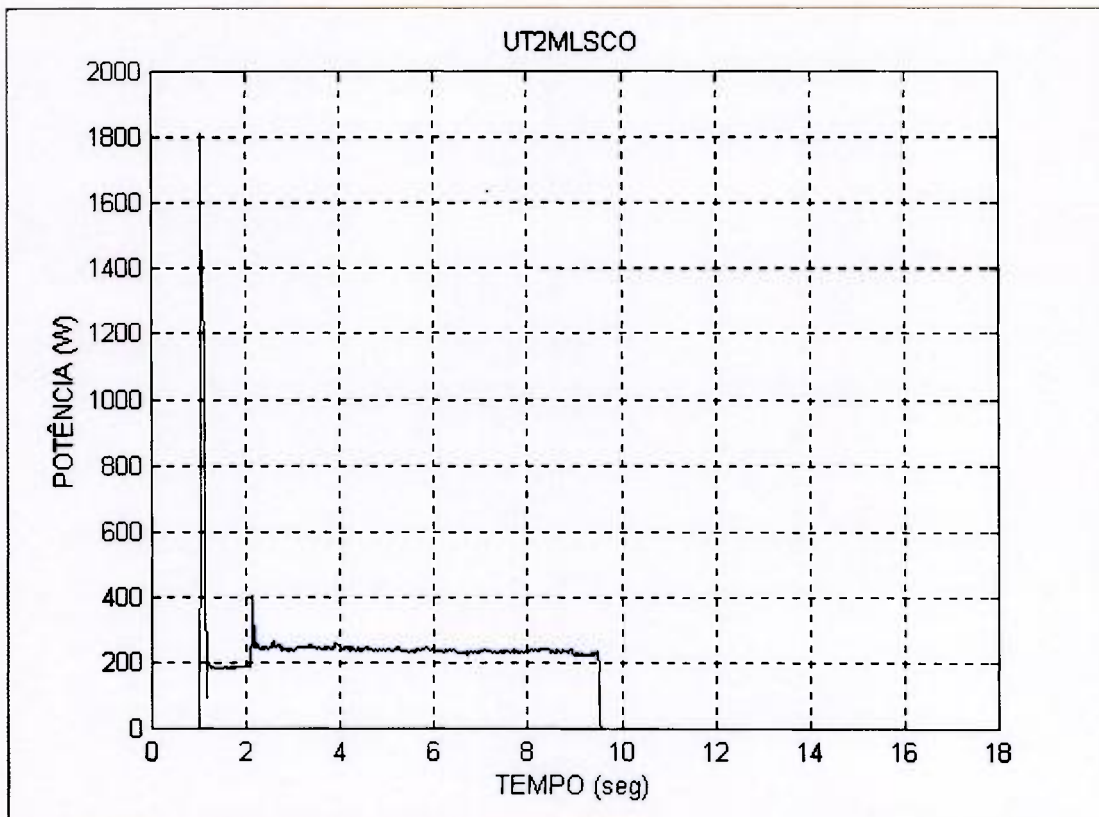


FIGURA 48: Arquivo UT2MLSCO - desajuste chave limite.

TABELA 10: Arquivo UT2MLSCO - RESULTADOS

CICLO DE ABERTURA								
ARQUIVO: UT2MLSCO (<i>desajuste chave limite</i>)								
EXTRAÇÃO DE EVENTOS			SISTEMA ESPECIALISTA				DIAGNÓSTICO	
PARÂMETRO DE SAÍDA	VALOR	FATOR DE NORMALIZAÇÃO FN	ENTRADA		SAÍDA		FALHA	SITUAÇÃO
			VARIÁVEL	VALOR	VARIÁVEL	VALOR		
1-TM	8.4900	0.3323	1-TM	2.8212	1-CL	1.74	C.L.	<i>Emerg.</i>
2-PM	237.3496	0.0193	2-PM	4.5808	2-O _b S	5.00	----	OK
3-P _c C	1810.7813	0.0028	3-P _c C	5.0702	3-O _b H	5.00	----	OK
4-P _c D	407.4531	0.0133	4-P _c D	5.4191	4-FE ₁	5.00	----	OK
5-PSC	184.4276	0.0256	5-PSC	4.7213	5-P _c D	5.38	----	OK
6-DP	6.7133	2.2097	6-DP	14.834	6-PSC	4.74	----	OK

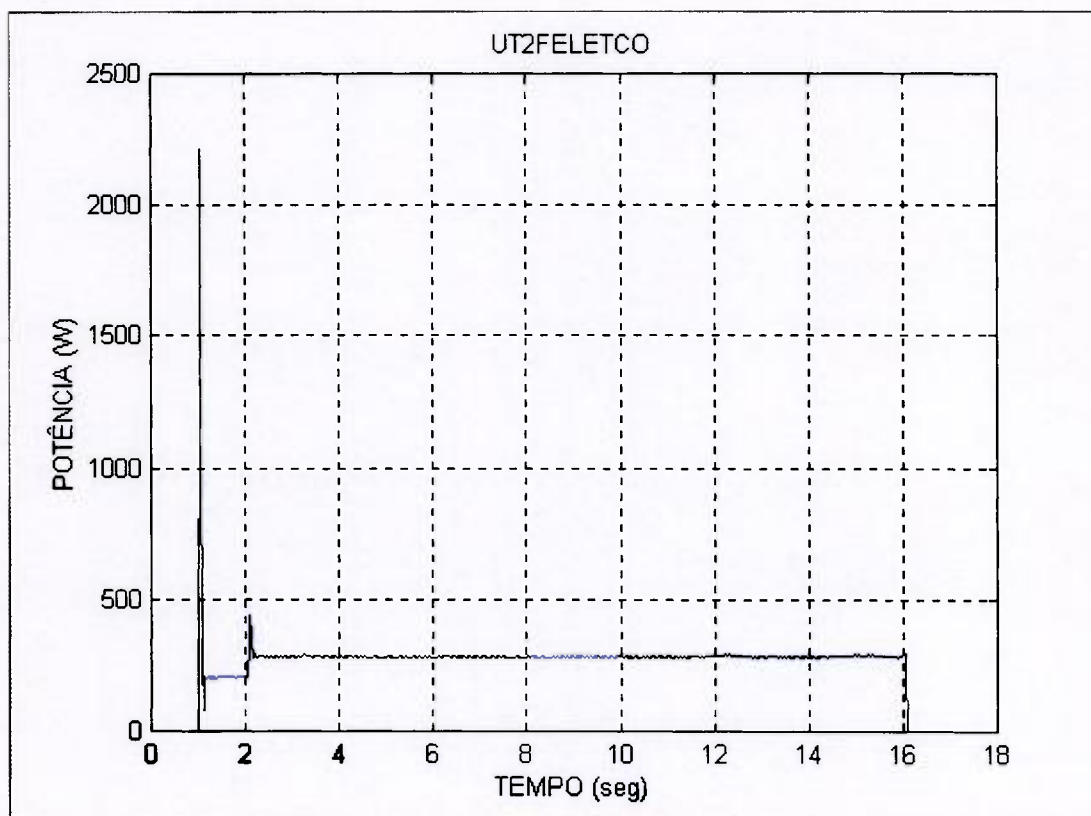


FIGURA 49: Arquivo UT2FELTCO - falha elétrica.

TABELA 11: Arquivo UT2FELTCO - RESULTADOS

CICLO DE ABERTURA								
ARQUIVO: UT2FELTCO (falha elétrica)								
EXTRAÇÃO DE EVENTOS			SISTEMA ESPECIALISTA				DIAGNÓSTICO	
PARÂMETRO DE SAÍDA	VALOR	FATOR DE NORMALIZAÇÃO FN	ENTRADA		SAÍDA		FALHA	SITUAÇÃO
			VARIÁVEL	VALOR	VARIÁVEL	VALOR		
1-TM	15.0450	0.3323	1-TM	4.994	1-CL	5.00	----	OK
2-PM	282.6784	0.0193	2-PM	5.4557	2-O _b S	5.00	----	OK
3-P _c C	2217.5460	0.0028	3-P _c C	6.2091	3-O _b H	5.00	----	OK
4-P _c D	437.6478	0.0133	4-P _c D	5.8207	4-FE ₁	7.31	Elétr.	Emerg
5-PSC	202.6991	0.0256	5-PSC	5.1891	5-P _c D	6.01	PSC	alerta
6-DP	2.2593	2.2097	6-DP	4.9924	6-PSC	5.19	----	OK

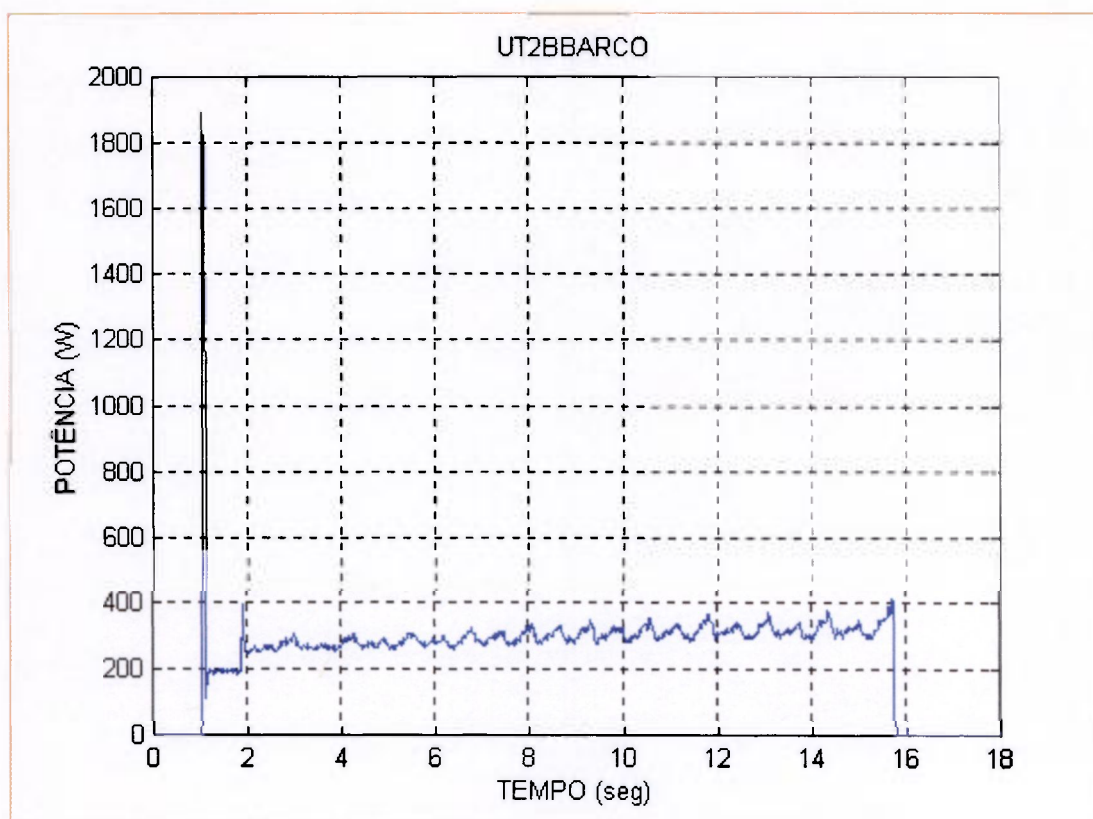


FIGURA 50: Arquivo UT2BBARCO - obstrução na haste.

TABELA 12: Arquivo UT2BBARCO - RESULTADOS

CICLO DE ABERTURA								
ARQUIVO: UT2BBARCO (obstrução na haste)								
EXTRAÇÃO DE EVENTOS			SISTEMA ESPECIALISTA				DIAGNÓSTICO	
PARÂMETRO DE SAÍDA	VALOR	FATOR DE NORMALIZAÇÃO FN	ENTRADA		SAÍDA		FALHA	SITUAÇÃO
			VARIÁVEL	VALOR	VARIÁVEL	VALOR		
1-TM	14.7300	0.3323	1-TM	4.8948	1-CL	4.88	----	OK
2-PM	296.4992	0.0193	2-PM	5.7211	2-O _b S	5.00	----	OK
3-P _c C	1895.3438	0.0028	3-P _c C	5.3069	3-O _b H	8.16	Mec.	<i>Emerg</i>
4-P _c D	393.2422	0.0133	4-P _c D	5.2301	4-FE ₁	5.67	Elétric	<i>alerta</i>
5-PSC	193.6247	0.0256	5-PSC	4.9568	5-P _c D	5.22	----	OK
6-DP	21.9185	2.2097	6-DP	48.433	6-PSC	4.95	----	OK

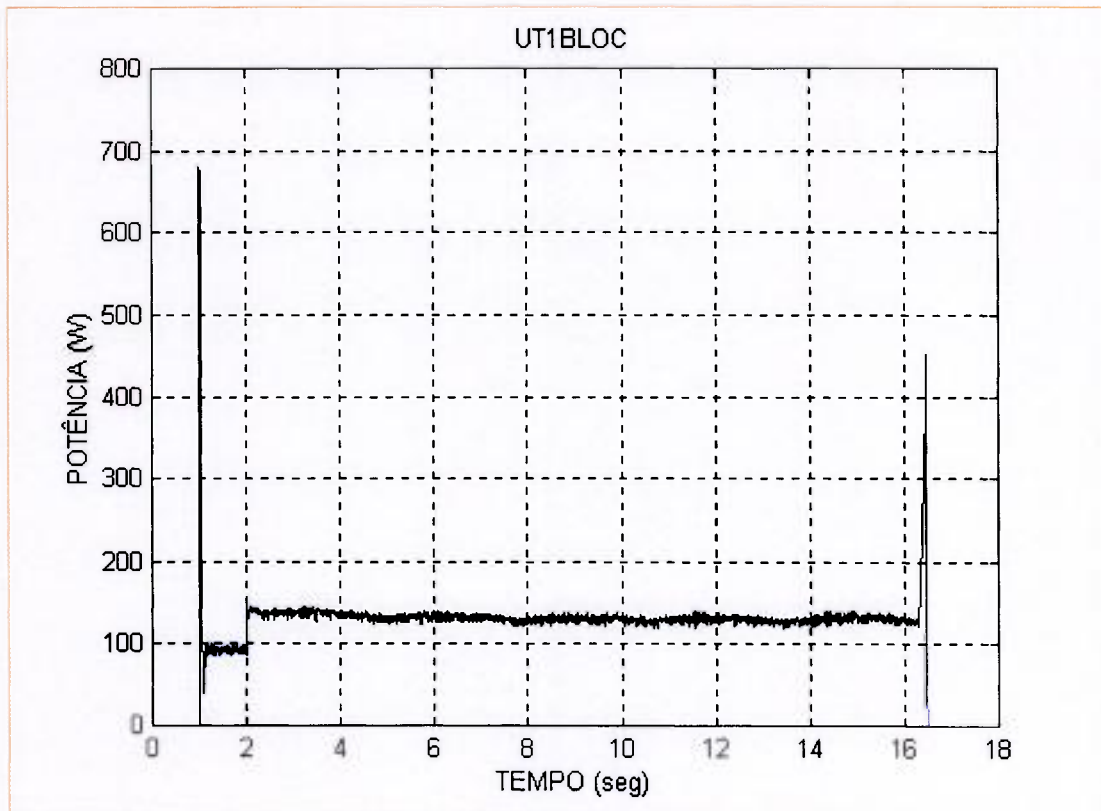


FIGURA 51: Arquivo UT1BLOC - assinatura padrão.

TABELA 13: Arquivo UT1BLOC - RESULTADOS

CICLO DE FECHAMENTO								
ARQUIVO: UT1BLOC (padrão)								
EXTRAÇÃO DE EVENTOS			SISTEMA ESPECIALISTA				DIAGNÓSTICO	
PARÂMETRO DE SAÍDA	VALOR	FATOR DE NORMALIZAÇÃO FN	ENTRADA		SAÍDA		FALHA	SITUAÇÃO
			VARIÁVEL	VALOR	VARIÁVEL	VALOR		
1-P _c A	429.1990	0.0117	1-P _c A	5.0216	1-CT	5.03	-----	padrão
2-TA _c	0.1750	28.5714	2-TA _c	5.0000	2-O _b S	5.00	-----	padrão
3-DPA	305.5900	0.0164	3-DPA	5.0117	3-O _b H	5.00	-----	padrão
4-PM	131.8408	0.0379	4-PM	4.9968	4-FE ₁	5.00	-----	padrão
5-TM	15.3450	0.3258	5-TM	4.9994	5-PSC	5.00	-----	padrão
6-P _c C	679.8520	0.0074	6-P _c C	5.0309	6-TM	5.00	-----	padrão
7-PSC	92.5863	0.0540	7-PSC	4.9997				
8-DP	3.3688	1.4846	8-DP	5.0000				

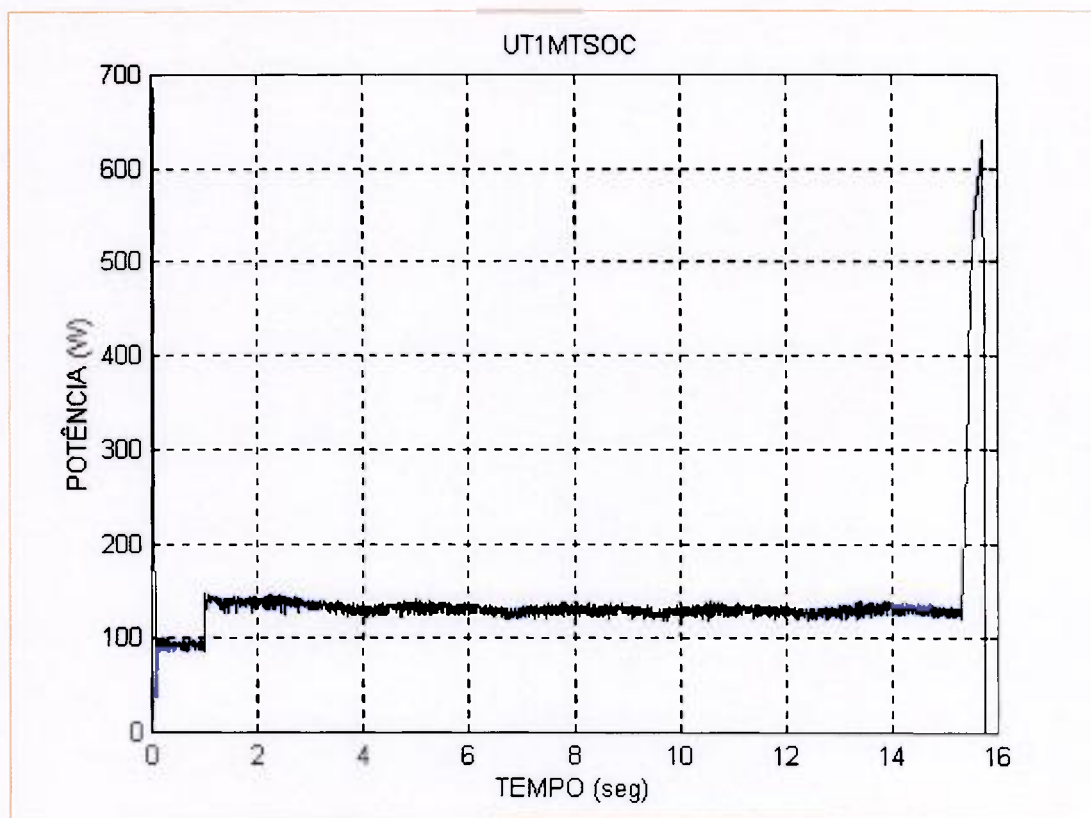


FIGURA 52: Arquivo UT1MITSOC - desajuste chave torque.

TABELA 14: Arquivo UT1MITSOC - RESULTADOS

CICLO DE FECHAMENTO								
ARQUIVO:UT1MITSOC								
EXTRAÇÃO DE EVENTOS			SISTEMA ESPECIALISTA				DIAGNÓSTICO	
PARÂMETRO DE SAÍDA	VALOR	FATOR DE NORMALIZAÇÃO FN	ENTRADA		SAÍDA		FALHA	SITUAÇÃO
			VARIÁVEL	VALOR	VARIÁVEL	VALOR		
1-P _c A	625.5660	0.0117	1-P _c A	7.3191	1-CT	8.26	C.T.	Emerg.
2-TA _c	0.1350	28.5714	2-TA _c	3.8570	2-O _b S	5.00	-----	OK
3-DPA	491.4455	0.0164	3-DPA	8.0597	3-O _b H	5.00	-----	OK
4-PM	131.8010	0.0379	4-PM	4.9952	4-FE ₁	5.00	-----	OK
5-TM	15.5950	0.3258	5-TM	5.0808	5-PSC	5.12	-----	OK
6-P _c C	699.8520	0.0074	6-P _c C	5.1789	6-TM	5.10	-----	OK
7-PSC	94.3445	0.0540	7-PSC	5.0951				
8-DP	3.3627	1.4846	8-DP	4.9923				

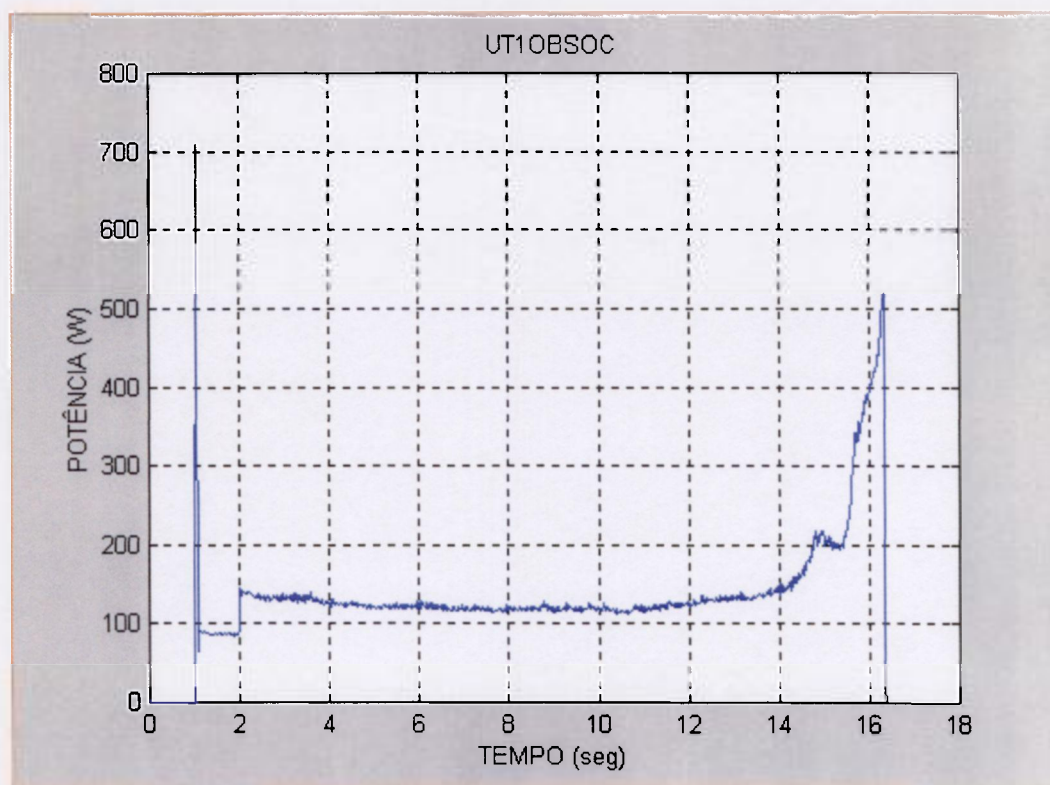


FIGURA 53: Arquivo UT1OBSOC - obstrução na sede.

TABELA 15: Arquivo UT1OBSOC - RESULTADOS

CICLO DE FECHAMENTO								
ARQUIVO:UT1OBSOC (obstrução mecânica na sede)								
EXTRAÇÃO DE EVENTOS			SISTEMA ESPECIALISTA				DIAGNÓSTICO	
PARÂMETRO DE SAÍDA	VALOR	FATOR DE NORMALIZAÇÃO FN	ENTRADA		SAÍDA		FALHA	SITUAÇÃO
			VARIÁVEL	VALOR	VARIÁVEL	VALOR		
1-P _c A	497.8711	0.0129	1-P _c A	6.4255	1-CT	7.45	C.T.	Emerg.
2-TA _c	1.1550	28.5714	2-TA _c	32.999	2-O _b S	8.26	Mec.	Emerg.
3-DPA	299.8672	0.0191	3-DPA	5.7275	3-O _b H	5.00	-----	OK
4-PM	130.0543	0.0379	4-PM	4.9291	4-FE ₁	5.00	-----	OK
5-TM	15.3150	0.3258	5-TM	4.9896	5-PSC	4.77	-----	OK
6-P _c C	709.6094	0.0074	6-P _c C	5.2511	6-TM	4.99	-----	OK
7-PSC	88.4282	0.0540	7-PSC	4.7751				
8-DP	18.9054	1.4842	8-DP	28.059				

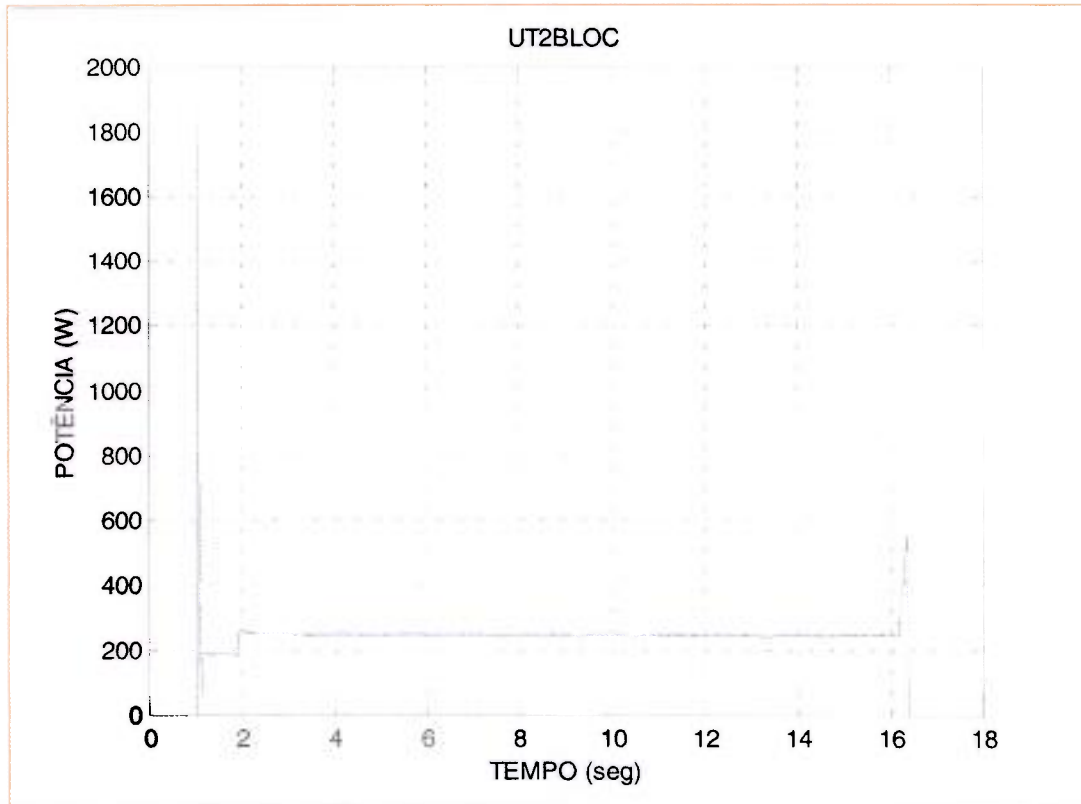


FIGURA 54: Arquivo UT2BLOC – assinatura padrão.

TABELA 16: Arquivo UT2BLOC - RESULTADOS

CICLO DE FECHAMENTO								
ARQUIVO: UT2BLOC (padrão)								
EXTRAÇÃO DE EVENTOS			SISTEMA ESPECIALISTA				DIAGNÓSTICO	
PARÂMETRO DE SAÍDA	VALOR	FATOR DE NORMALIZAÇÃO FN	ENTRADA		SAÍDA		FALHA	SITUAÇÃO
			VARIÁVEL	VALOR	VARIÁVEL	VALOR		
1-P _c A	540.7061	0.0093	1-P _c A	5.0286	1-CT	5.04	-----	padrão
2-TA _c	0.1950	25.6410	2-TA _c	5.0000	2-O _b S	5.00	-----	padrão
3-DPA	294.2647	0.0170	3-DPA	5.0025	3-O _b H	5.00	-----	padrão
4-PM	247.9245	0.0202	4-PM	5.0080	4-FE ₁	5.00	-----	padrão
5-TM	15.3450	0.3258	5-TM	5.0000	5-PSC	5.00	-----	padrão
6-P _c C	1852.1172	0.0027	6-P _c C	5.0007	6-TM	5.00	-----	padrão
7-PSC	185.0626	0.0270	7-PSC	4.9967				
8-DP	2.5699	1.9456	8-DP	5.0000				

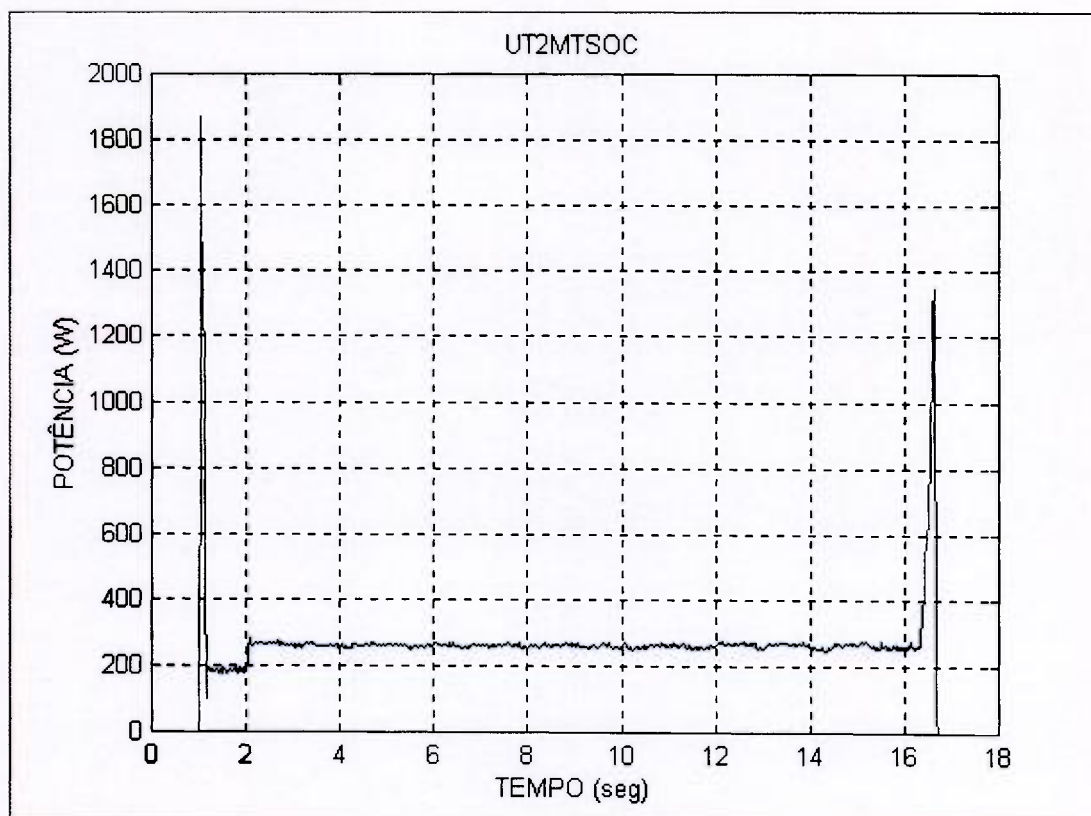


FIGURA 55: Arquivo UT2MTSOC- desajuste chave torque.

TABELA 17: Arquivo UT2MTSOC - RESULTADOS

CICLO DE FECHAMENTO								
ARQUIVO: UT2MTSOC (<i>desajuste chave de torque</i>)								
EXTRAÇÃO DE EVENTOS			SISTEMA ESPECIALISTA				DIAGNÓSTICO	
PARÂMETRO DE SAÍDA	VALOR	FATOR DE NORMALIZAÇÃO FN	ENTRADA		SAÍDA		FALHA	SITUAÇÃO
			VARIÁVEL	VALOR	VARIÁVEL	VALOR		
1-P _c A	1.322.339	0.0093	1-P _c A	12.297	1-CT	8.26	C.T.	Emerg.
2-TA _c	0.1500	25.6410	2-TA _c	3.8461	2-O _b S	5.00	-----	OK
3-DPA	1059.558	0.0170	3-DPA	18.012	3-O _b H	5.00	-----	OK
4-PM	260.88353	0.0202	4-PM	5.2688	4-FE ₁	5.00	-----	OK
5-TM	15.6150	0.3258	5-TM	5.0873	5-PSC	5.02	-----	OK
6-P _c C	18873.304	0.0027	6-P _c C	5.0579	6-TM	5.11	-----	OK
7-PSC	185.8442	0.0270	7-PSC	5.0177				
8-DP	3.1627	1.9456	8-DP	6.1533				

6.2 RESULTADOS COM APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE WAVELET

Foram duas as situações analisadas de falhas mecânicas envolvendo a aplicação da transformada de *wavelet* discreta. No primeiro caso, a falha é caracterizada por uma obstrução excessiva devido ao envergamento da haste da válvula. No segundo, a falha é originada por desgaste mecânico da engrenagem da caixa de redução.

Como o principal objetivo da aplicação da transformada discreta de *wavelet* consiste na identificação da falha no estado incipiente, e o dado real das duas situações de falhas encontram-se em estado avançado, foi necessário fazer uma regressão dos dados simulando uma condição inicial de falha ou seja estado incipiente. Desta maneira foi possível avaliar a sensibilidade de detecção de falha do sistema.

CASO 1: A falha apresentada no primeiro caso consiste em uma situação de obstrução mecânica durante a movimentação de abertura da válvula. Nesse caso são apresentados 4 sinais, sendo:

- a primeira assinatura, a situação normal sem falha, denominada de padrão ou referência,
- a quarta assinatura, apresenta falha real de obstrução mecânica no movimento de abertura,
- as assinaturas 2 e 3 foram simuladas fazendo-se uma regressão do sinal de falha chegando próximo da situação normal ou situação padrão.

O objetivo da regressão está na observação e detecção da falha ainda no estado incipiente, diagnosticando uma situação inicial de falha.

As assinaturas de potência no domínio do tempo nos quatro estágios estão apresentadas na Figura 56 intitulada evolução de falhas-obstrução na movimentação.

EVOLUÇÃO DE FALHA
(obstrução na movimentação)

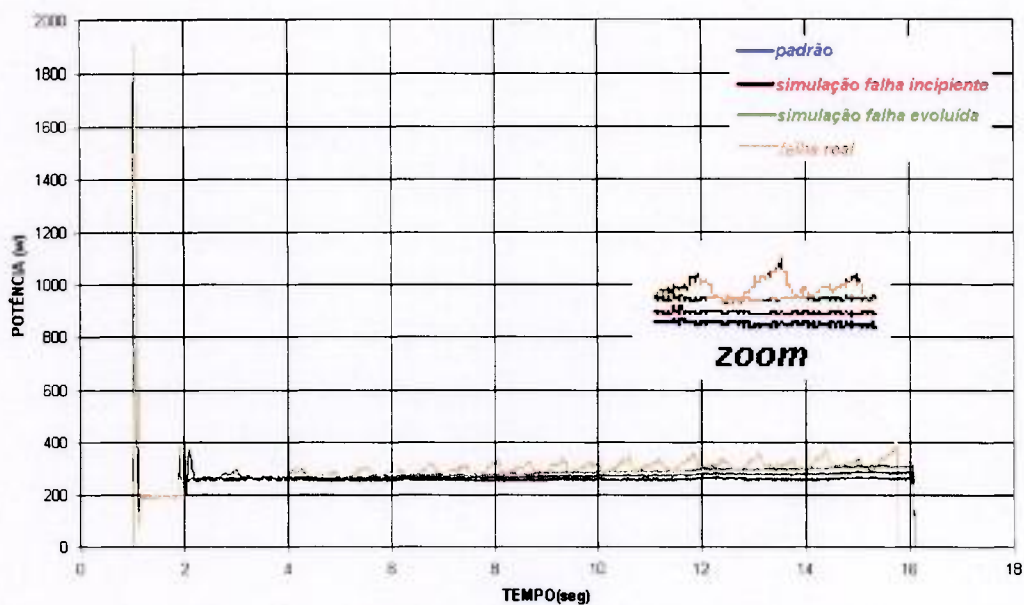


FIGURA 56: Evolução de falhas, obstrução na movimentação.

Para análise desses sinais, foi utilizada a wavelet tipo "Daubechies"4, nível de decomposição 6. A Figura 57 apresenta as aproximações para os 6 níveis de decomposição do sinal com a falha real.

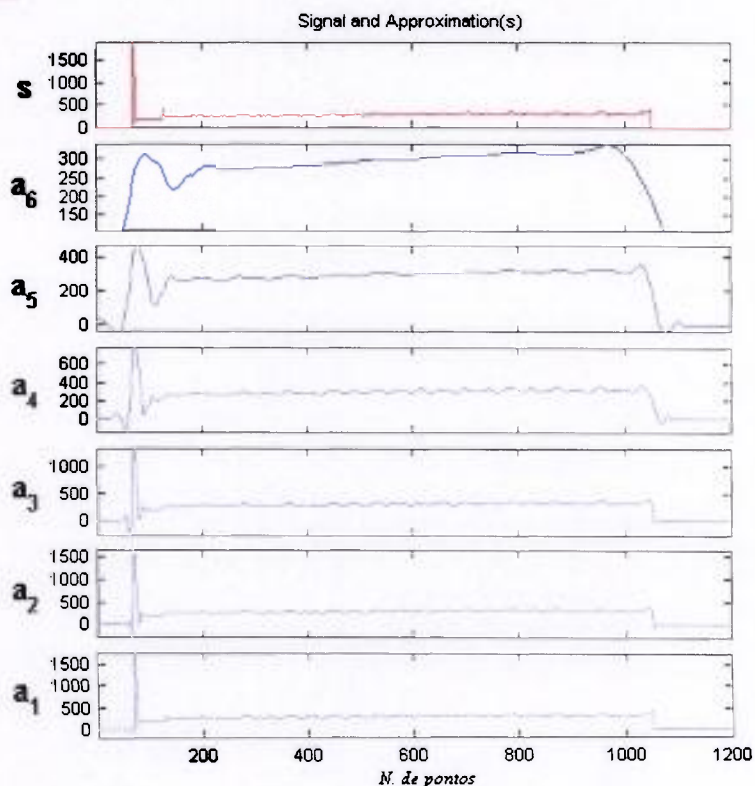


FIGURA 57: Sinal original e as decomposições.

A Figura 58 apresenta a sobreposição dos quatro casos analisados, ou seja, situação padrão (sem falha), simulação falha incipiente, simulação falha evoluída e a situação de falha real. Os resultados estão apresentados para todo o ciclo de abertura da válvula. Para essa análise foi utilizada wavelet tipo db4, nível 6 e estão apresentadas as aproximações de nível 6 para cada sinal analisado.

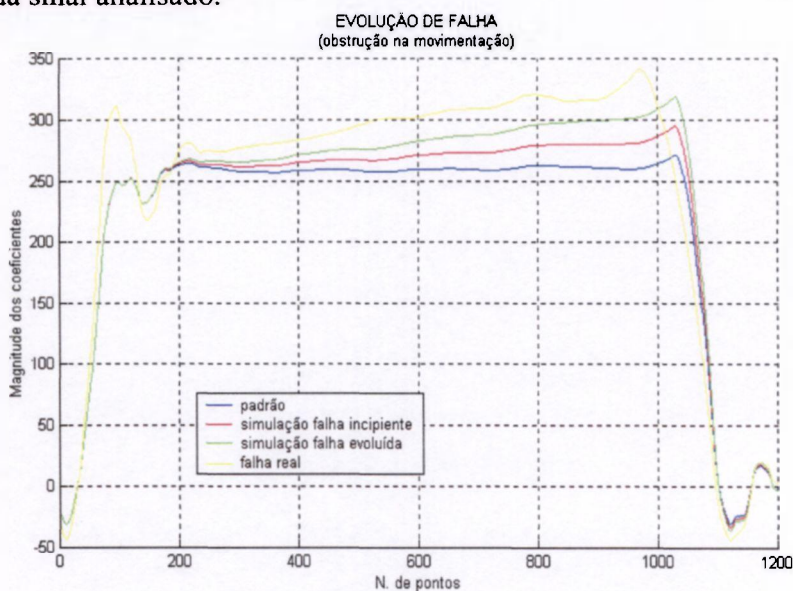


FIGURA 58: Análise de evolução de falha - ciclo total.

A Figura 59 apresenta a análise da evolução de falha na região de interesse, ou seja, durante o intervalo de tempo de movimentação da haste da válvula propriamente dito.

Este gráfico evidencia a sensibilidade de detecção da falha ainda no estágio incipiente.

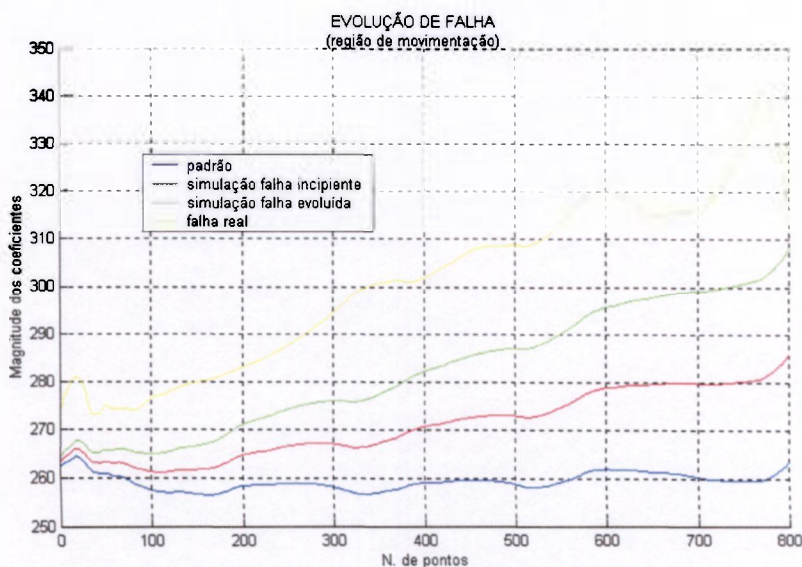


FIGURA 59: Análise de evolução de falha na região de movimentação da haste.

CASO 2: A falha apresentada neste caso consiste em uma situação de desgaste de engrenagem da caixa de redução do atuador. A assinatura de potência analisada foi obtida durante a movimentação de abertura da válvula.

Nesse caso, são apresentados 5 assinaturas, sendo:

- a primeira assinatura consiste na situação normal (sem falha), denominada de padrão ou referência,
- a quinta assinatura apresenta falha real devido a desgaste na engrenagem,
- as assinaturas 2, 3 e 4 foram simuladas fazendo uma regressão do sinal de falha chegando próximo a situação normal, simulando a situação de falha incipiente.

A Figura 60 apresenta a sobreposição das assinaturas de potência no domínio do tempo para as cinco situações.

Obs.: A assinatura de potência da condição padrão não aparece no gráfico a seguir devido a sobreposição das assinaturas.

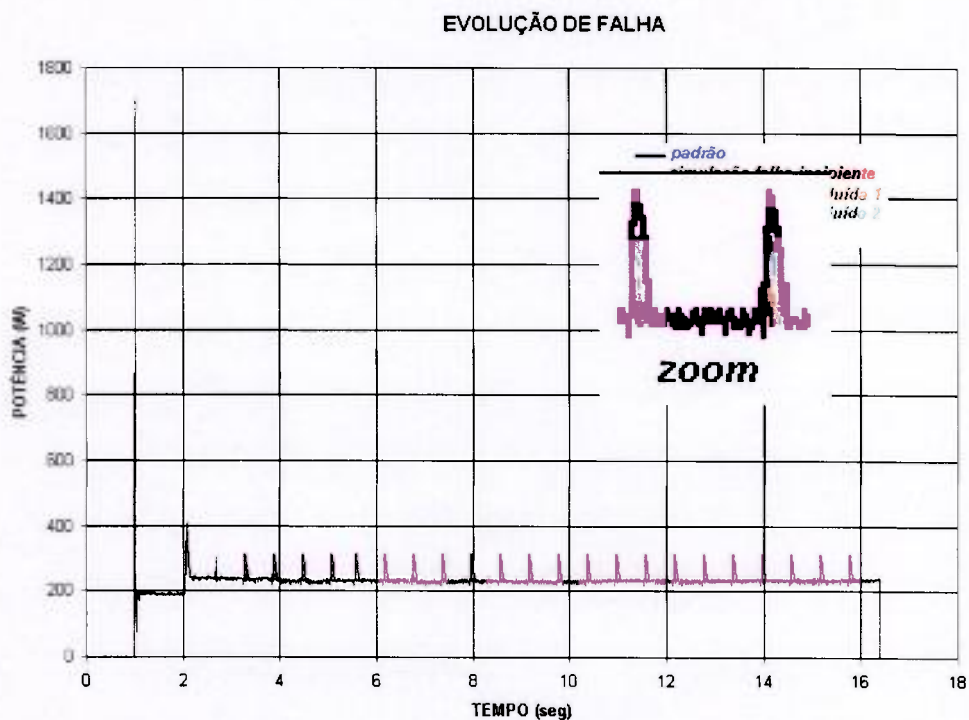


FIGURA 60: Assinaturas de potência – evolução de falha de desgaste de engrenagem.

A análise do sinal na condição de falha real de desgaste de engrenagem, com aplicação da transformada discreta de wavelet, utilizando wavelet “Daubechies” tipo db4, nível 6, está apresentada a seguir na Figura 61.

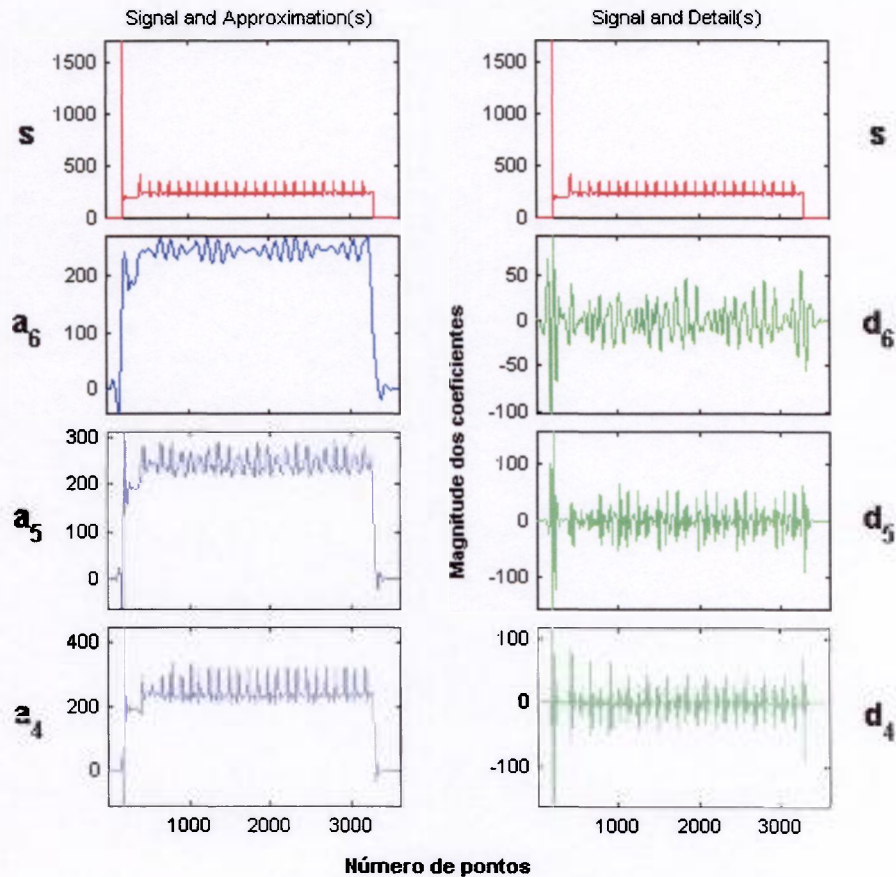


FIGURA 61. Análise do sinal com falha real.

A Figura 62 apresenta os resultados da aplicação da transformada de wavelet discreta do tipo Daubechies db4 com nível de decomposição “6”.

Na figura estão apresentados os resultados de detalhe devido a atenção especial às componentes de alta frequência, ao longo de todo o tempo de movimentação da válvula.

São cinco gráficos que apresentam a evolução da falha, sendo:

1-Resultado da aplicação da TDW para a situação padrão, ou seja para a assinatura de potência de uma válvula sem defeito.

2-Resultado para a situação de falha simulada denominada “incipiente”.

3-Resultado para situação simulada de falha denominada “evoluída 1”.

4- Resultado para situação simulada de falha denominada “evoluída 2”.

5- Resultado para situação de falha real.

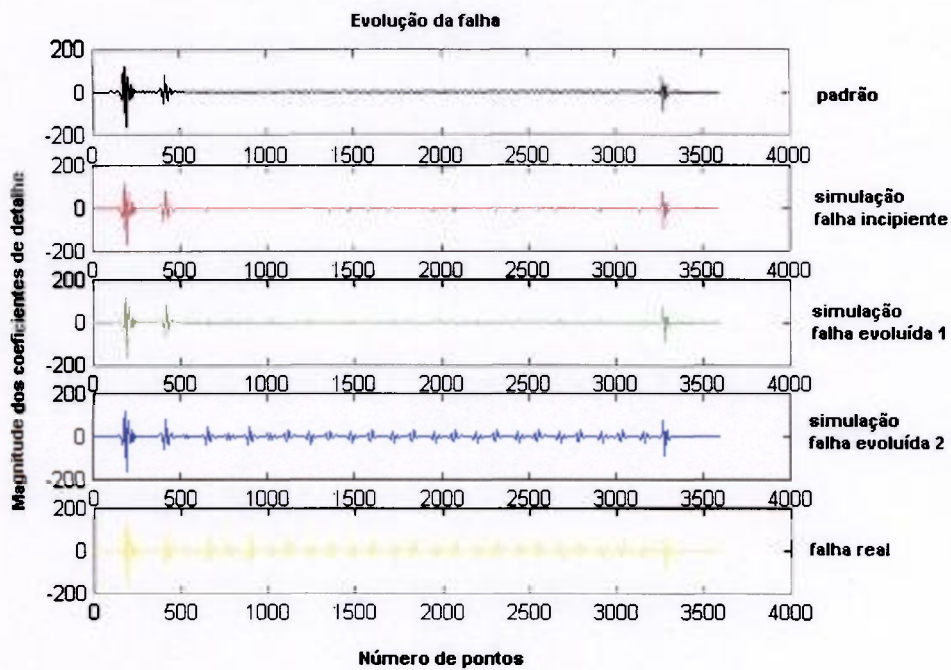


FIGURA 62: Evolução da falha - ciclo total de movimentação.

A Figura 63 apresenta os mesmos resultados, porém na região de movimentação da haste da válvula, evidenciando a identificação da falha durante toda evolução.

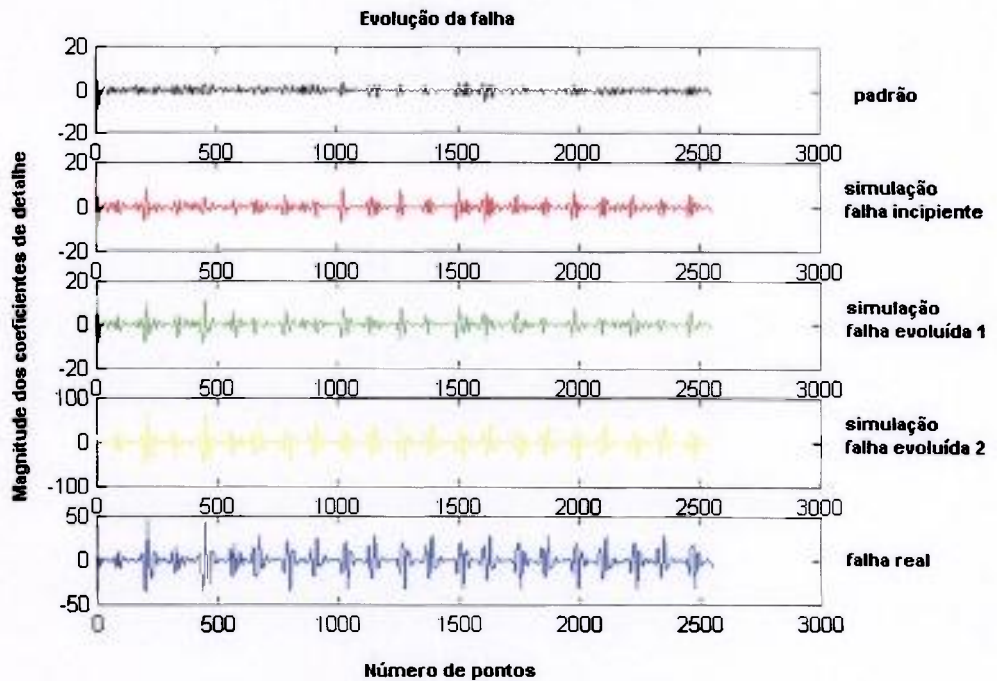


FIGURA 63: Evolução da falha na região de movimentação.

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados estão divididos de acordo com o método aplicado para análise e diagnóstico, utilizando a base de dados, sendo as rotinas implementadas e testadas isoladamente.

7.1 RESULTADOS OBTIDOS COM APLICAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA

A utilização do sistema especialista com aplicação da lógica nebulosa apresentou excelentes resultados, consistentes com as condições pré estabelecidas, sejam elas situações padrões ou de falhas.

O objetivo principal da aplicação do sistema especialista consiste na identificação e caracterização de falhas de ajustes das chaves limite e torque, sendo este objetivo alcançado com sucesso conforme resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6, demonstrando a funcionalidade do sistema de forma categórica com o diagnóstico de falha apresentado.

Os resultados obtidos com os dados simulados serviram para demonstrar a sensibilidade do sistema para situações de falhas incipientes, dando como resultados as situações de alerta e atenção.

Ainda com aplicação do sistema especialista implementado pela lógica nebulosa, foram realizadas análises para outros tipos de falhas como as falhas provenientes de problemas mecânicos e elétricos, sendo os casos dos arquivos de dados UT1OBSOC, UT2BBARCO e UT2FELTCO.

Estes dados tratam de falhas mecânicas provenientes de obstrução durante a movimentação da válvula e falha elétrica provenientes de problemas de isolamento elétrica na partida do motor.

Os resultados foram razoáveis, pois o sistema identificou as falhas corretamente para as situações que chamamos de falha evoluída, ou seja, situações de falha em estado avançado, porém para as situações de falhas iniciais ou incipientes o sistema não respondeu corretamente.

7.2 RESULTADOS OBTIDOS COM APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DISCRETA DE WAVELET

O objetivo da aplicação da transformada discreta de wavelet, consiste em obter informações mais detalhadas dos sinais de potência durante a movimentação da válvula.

A atenção principal está na identificação e caracterização de falhas provenientes de problemas mecânicos.

No caso, foram duas as situações com dados disponíveis com causa e efeito conhecido: obstrução da haste devido a envergamento durante a movimentação da válvula e desgastes de engrenagens da caixa de redução do atuador.

Os casos analisados com aplicação desse método apresentaram excelentes resultados com significativa eficiência e sensibilidade, evidenciando toda evolução da falha desde o início até a situação crítica.

Isto pode ser observado nos gráficos com os resultados obtidos (FIG 58, 59, 62, 63) nas quais está bem caracterizado todo o crescimento das falhas.

No caso da falha proveniente da obstrução da movimentação da haste, ficou mais evidente a análise através dos coeficientes de aproximação (FIG.58, 59) devido a atenção maior às componentes de baixa frequência.

No caso da falha proveniente de desgastes de engrenagem, a evidência na caracterização do problema se deu através da análise dos coeficientes de detalhe (FIG.62, 63) devido a observação das componentes de alta frequência, originadas pela movimentação das engrenagens da caixa de redução.

8. CONCLUSÃO

O sistema de monitoração e diagnóstico desenvolvido atingiu os objetivos propostos para o trabalho, direcionados a uma metodologia de monitoração e obtenção de diagnóstico qualitativo das condições operacionais elétricas e mecânicas de válvulas moto-operadas.

O enfoque principal da tese consiste na aplicação de métodos avançados de processamento e análise de sinais buscando identificar e caracterizar com antecedência a ocorrência de possíveis falhas. Este objetivo foi amplamente contemplado no sistema desenvolvido.

A utilização do sistema especialista com aplicação da lógica nebulosa contribuiu significativamente proporcionando o diagnóstico qualitativo de forma sistemática e simples para situações complexas devido ao processamento e análise de vários parâmetros monitorados.

A sensibilidade do sistema para a detecção de falhas para as situações de desajustes das chaves limite e torque foi plenamente atingida, sendo esta a principal aplicação do sistema especialista no diagnóstico. Além disso o sistema especialista mostrou a possibilidade da identificação e caracterização de falha elétrica e mecânica mesmo que para situações de falhas mais críticas.

A aplicação da transformada de wavelet contribuiu de forma significativa pela sua eficiência na sensibilidade da detecção de fenômenos de curta duração, contribuindo com relevância na identificação da falha no estado incipiente, localizando tais eventos no tempo e na frequência simultaneamente com relativa precisão.

Sobre o ponto de vista prático, alguns pontos são importantes ressaltar como repercussão da disponibilidade do sistema desenvolvido para uma planta nuclear de potência:

- Subsídio importante para o operador da planta, estabelecendo uma monitoração das condições operacionais da válvula;
- Não interferência na operação normal da planta;
- Redução de exposição à dose de radiação do pessoal técnico,
- Contribuição na programação da manutenção durante a parada da usina,

Como benefícios do desenvolvimento do trabalho são destacados os seguintes aspectos:

- **Técnico:** capacitação para soluções de problemas em nossas plantas nucleares,
- **Científico:** intercâmbio com instituições internacionais de excelência na área de monitoração e diagnóstico,
- **Econômico:** possibilidade de prestação de serviços com alta qualidade, baixos custos, evitando contratação de empresas estrangeiras.

8.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento de bancadas de testes com válvulas moto-operadas em uso nas plantas brasileiras para levantamento de ensaios com falhas com controle sobre as causas e feitos,
- Enriquecimento do banco de conhecimento e por consequência da base de regras estabelecidas no sistema especialista,
- Automação do método de análise utilizando a transformada de wavelet discreta, através da utilização dos coeficientes de aproximação e detalhe gerados no processo,
- Implementação efetiva do sistema nas usinas nucleares brasileiras.

APÊNDICE A: PROGRAMA MENUP

```

k1=0;
clc;
home;
while k1<11,
    clc;
    k1=menu('Diagnostico de Valv Moto-Operadas',...
        'Ler arq. de assinatura',...    %1
        'Plotar assinatura.',...      %2
        'Arq. de parâmetros',...     %3
        'Lev. Eventos (fecham.)',...  %4
        'Lev. Eventos (abert.)',...  %5
        'Output filtros - steps',...  %6
        'Output filtros - rampas',... %7
        'Ver Eventos',...            %8
        'Análise - Wevelet',...      %9
        'Análise - Lógica Fuzzy',... %10
        'Sair');
    if k1==1
        fler;
        a0=pontos(:,1)';
        b0=pontos(:,2)';
    end;
    %*****
    if k1==2
        plot(a0,b0);
        title('b = pontos orig. ');
        zoom on
    end;
    %*****
    if k1==3
        s= '! notepad fparam.m';
        eval(s);
    end;
    %*****
    if k1==4
        fparam;
        idev;
        flag1 = 0;
        [mst,nst]=size(degraus);
        if mst<4

```

```

    flag1=flag1+1;
end;
[mrp,nrt]=size(rampa);
if mrp<1
    flag1=flag1+10;
end;
[mpc,npc]=size(pico2);
if mpc<1
    flag1=flag1+100;
end;
if flag1==0
    guardev1;
    salvaev1;
else
    clc;
    disp ('Erro no padrao da assinatura');
    disp ('erro = ');
    disp (flag1);
    pause;
end;
end;
*****
if k1==5
    fparam;
    idev2;
    flag2=0;
    [mst,nst]=size(degraus);
    if mst<4
        flag2=flag2+1;
    end;
    rampa=0;
    [mpc,npc]=size(pico2);
    if mpc<1
        flag2=flag2+100;
    end;
    if flag2==0
        guardev2;
        salvaev2;
    else
        clc;
        disp ('Erro no padrao da assinatura');
        disp ('erro = ');
        disp (flag2);
        pause;
    end;
end;
*****

```

```

    if k1==6
        fout1;
    end;
%*****
    if k1==7
        fout2;
    end;
%*****
    if k1==8
        subplot(2,1,1);
        plot(a0,b0);
        title('pontos orig. ');
        subplot(2,1,2);
        plot(tev,pev);
        title('assinatura p/ eventos ');
    end;
%*****
    if k1==9

        %sai do menu
    end;
%*****
    if k1==10
        fuzzy
    end;
end
%*****
% fler
nome = input('nome do arquivo: ','s');
ext = '.prn';
load(nome);
pontos =eval(strtok(nome,ext));
% funcao ffilpic
    ppic =25;
    ppic =25;
% funcao: fred
    p13 = 0;
    p14 = 0;
    p15 = 2.0;
    p13 = 0;
    p14 = 0;
    p15 = 2;
% funcao: fmed
    p23 = 20;
    p24 = 20;
% funcao: fslop
    p33 = 1;

```

```

p34 = 1;
% funcao: fhslop
p43 = 0.015*15;
p44 = 15;
% funcao: fps
p53 = 800;
% funcao: fred
pr11 = 0;
pr12 = 0;
pr13 = 2;
% funcao: fmed
pr21 = 1;
pr22 = 1;
% funcao: fslop
pr31 = 3;
pr32 = 3;
% funcao: fhslop
pr41 = 0.15;
pr42 = 15;
pr41 = 0.15;
pr42 = 15;
% funcao: fdeg
pr51 = 1;
pr52 = 0;
pr53 = 0;
pr54 = 1;
% identifica picos
*****
[br,ar]=reduzmat(b0,a0);
[pico,vale,tpico,tvale,h]=fpico(br,ar);
[pico2,vale2,tpico2,tvale2,h2]=ffilpic(pico,vale,tpico,tvale,h,
ppic);
% identifica steps
*****
clc;
disp('procurando steps...');
[a,b]=fred(a0,b0,p13,p14,p15);
b1=fmed(b,p23,p24);
b2=fslop(b1,a,p33,p34);
b3=fhslop(b2,a,p43,p44);
b4=b2-b3;
degraus=fps(a,b,b4,p53);
disp('steps encontrados. ');
% identifica rampa
*****
disp('procurando rampa...');
br=fc4(b0,0.75);

```

```

[ar,br]=fred(a,br,pr11,pr12,pr13);
br1=fmed(br,pr21,pr22);
br2=fslop(br1,ar,pr31,pr32);
br3=fhslop(br2,ar,pr41,pr42);
rampa=fdeg(ar,br3,br,pr51,pr52,pr53,pr54);
disp('rampa encontrada.');
```

```

function [pico,vale,tpico,tvale,h]= fpico(pot,t)
np=max(size(pot,1),size(pot,2));
    if (pot(1)<pot(2))&(pot(np-1)<pot(np))
        caso =1;
    elseif (pot(1)<pot(2))&(pot(np-1)>pot(np))
        caso =2;
    elseif (pot(1)>pot(2))&(pot(np-1)<pot(np))
        caso =3;
    else
        caso =4;
    end
    if caso==1
        pot= [pot(2) pot pot(np-1)];
        t = [t(1) t t(np)+2*(t(np)-t(np-1))];
        np = np+2;
    elseif caso==2
        pot= [pot(2) pot];
        t = [t(1)-(t(2)-t(1)) t];
        np = np+1;
    elseif caso==3
        pot= [pot pot(np-1)];
        t = [t t(np)+(t(np)-t(np-1))];
        np = np+1;
    else
        end
    *****
    npico = 1;
    nvale = 1;
    for i=2:np-1,
        if (pot(i-1)<pot(i)) & (pot(i)>pot(i+1))
            pico(npico)=pot(i);
            tpico(npico)=t(i);
            npico=npico+1;
        end
    end
    for i=2:np-1,
        if (pot(i-1)>pot(i)) & (pot(i)<pot(i+1))
            vale(nvale)=pot(i);
            tvale(nvale)=t(i);
            nvale=nvale+1;
        end
    end

```

```

    end
  end
  npico = npico-1;
  nvale = nvale-1;
  if tpico(1)<tvale(1)
    for i=1:npico,
      if i == 1
        h(i)=pico(i)-vale(i);
      else
        h(i)=min([(pico(i)-vale(i-1)) (pico(i)-vale(i))]);
      end
    end
  else
    for i=1:npico,
      if i == npico
        h(i)=pico(i)-vale(i);
      else
        h(i)=min([(pico(i)-vale(i)) (pico(i)-vale(i+1))]);
      end
    end
  end
end
%*****
function [pf,vf,tpf,tvf,hf]=ffilpic(p,v,tp,tv,h,z)
sai=0;
while sai ==0
n=max(size(p,1),size(p,2));
  if (rem(n,10)==0)
    clc;
    n=n
  end
  if tv(1)<tp(1)
    di=0;
  else
    di=1;
  end
  hmin = min(h);
  if hmin <= z
    pp=0;
    if n ==1
      sai=1;
      p=[];
      tp=[];
      tv=[];
      v=[];
      h=[];
    else
      for i=1:n

```

```

if (h(i) <= hmin) & (i <= n) & (pp == 0)
    pp = 1;
    if (i == n) & (n > 1)
        caso = 1;
        p = p(1:n-1);
        tp = tp(1:n-1);
        if tv(1) < tp(1)
            v = v(1:n-1);
            tv = tv(1:n-1);
        else
            if v(n-1) > v(n)
                if n > 2
                    v = [v(1:n-2) v(n)];
                    tv = [tv(1:n-2) tv(n)];
                else
                    v = v(n);
                    tv = tv(n);
                end
            else
                v = v(1:n-1);
                tv = tv(1:n-1);
            end
        end
    end
    if (i == 1)
        caso = 2;
        p = p(2:n);
        tp = tp(2:n);
        if tv(1) < tp(1)
            if v(1) < v(2)
                if n > 2
                    v = [v(1) v(3:n)];
                    tv = [tv(1) tv(3:n)];
                else
                    v = v(1);
                    tv = tv(1);
                end
            else
                v = v(2:n);
                tv = tv(2:n);
            end
        else
            v = v(2:n);
            tv = tv(2:n);
        end
    end
    if (i > 1) & (n > 1) & (i ~ = n)

```

```

        caso=3;
        p=[p(1:i-1) p(i+1:n)];
        tp=[tp(1:i-1) tp(i+1:n)];
        if v(i-di)<=v(i-di+1)
            ii=i-di+1;
        else
            ii=i-di;
        end
        iii=min([ii+1 n]);
        if ii==iii
            v=v(1:ii-1);
            tv=tv(1:ii-1);
        else
            v=[v(1:ii-1) v(iii:n)];
            tv=[tv(1:ii-1) tv(iii:n)];
        end
    end
    end
    n=n-1;
    break;
end
end
end
n=max(size(p,1),size(p,2));
h=[];
if tp(1)<tv(1)
    for i=1:n,
        if i == 1
            h(i)=p(i)-v(i);
        else
            h(i)=min([(p(i)-v(i-1)) (p(i)-v(i))]);
        end
    end
else
    for i=1:n,
        if i == n
            h(i)=p(i)-v(i);
        else
            h(i)=min([(p(i)-v(i)) (p(i)-v(i+1))]);
        end
    end
end
end
sai = 1;
end
end
clc;
n=n

```

```

pf=p;
tpf=tp;
vf=v;
tvf=tv;
hf=h;
%*****
function [ared,bred]=fred(a,b,t1,t2,h)
    n=max(size(a,1),size(a,2));
    j=0;
    for i =1:n
        if (rem(i,h)==0) |(a(i)<t1) |(a(i)>t2)
            j=j+1;
            ared(j)=a(i);
            bred(j)=b(i);
        end
    end
%*****
function z=fmed(a,n1,n2)
    n=max(size(a,1),size(a,2));
    for i =1:n
        l1=max([1 i-n1]);
        l2=min([n i+n2]);
        a1(i)=median(a(l1:l2));
    end
    z=a1;
%*****
function z=fslope(a,t,n1,n2)
    n=max(size(a,1),size(a,2));
    for i =1:n
        l1=max([1 i-n1]);
        l2=min([n i+n2]);
        s=polyfit(t(l1:l2),a(l1:l2),1);
        a1(i)=s(1);
    end
    z=a1;
%*****
function z=fhslop(a,t,zh,zv)
    n=max(size(a,1),size(a,2));
    ap=a*0;
    an=a*0;
    t0=t(1);
    i0=1;
    ifim=1;
    k=0;
    for i=1:n
        if (a(i)>zv)&(i<n)
            ifim =i;

```

```

else
    if (t(ifim)-t(i0))>=zh
        for j=i0:ifim-1
            ap(j)=mean(a(i0:ifim-1));
        end
    else
        for j=i0:ifim-1
            ap(j)=0;
        end
    end
    ifim=i;
    i0=ifim;
end
end
i0=1;
ifim=2;
for i=1:n
    if ((-a(i))>zv)&(i<n)
        ifim = i ;
    else
        if (t(ifim)-t(i0))>=zh
            for j=i0:ifim-1
                an(j)=mean(a(i0:ifim-1));
            end
        else
            for j=i0:ifim-1
                an(j)=0;
            end
        end
        ifim = i;
        i0=ifim;
    end
end
end
z=ap+an;
%*****
function z=fps(t,y,yf,hv)
n=max(size(t,1),size(t,2));
k=1;
step(k,1)=1;
step(k,2)=t(1);
step(k,3)=0;
step(k,2)=0;
for i=2:n-1
    if (yf(i))>=hv
        if (yf(i)>=yf(i-1))&(yf(i)>=yf(i+1))
            k=k+1;
            step(k,1)=i;
        end
    end
end

```

```

        step(k,2)=t(i);
    end
end
    if (yf(i))<=-hv
        if (yf(i)<=yf(i-1))&(yf(i)<=yf(i+1))
            k=k+1;
            step(k,1)=i;
            step(k,2)=t(i);
        end
    end
end
k=k+1;
step(k,1)=n;
step(k,2)=t(n);
step(k,3)=0;
for i=2:k-1
    l1 = step(i,1);
    l2 = step(i+1,1);
    step(i,3)=median(y(l1:l2));
end
z=step;
%*****
function z=fdeg(t,yd,y,hi1,hi2,hf1,hf2)
    n=max(size(y,1),size(y,2));
    j=0;
    for i=1:n-1
        if (yd(i)==0)&(yd(i+1)~=0)
            j=1;
            deg(j,1)=t(i);
            deg(j,2)=i;
            deg(j,3)=median(y(i-hi1:i+hi2));
        end
        if (yd(i)~=0)&(yd(i+1)==0)
            deg(j,4)=t(i);
            deg(j,5)=i;
            deg(j,6)=median(y(i-hf1:i+hf2));
        end
    end
end
z=deg;
%*****
[br,ar]=reduzmat(b0,a0);
[pico,vale,tpico,tvale,h]=fpico(br,ar);
[pico2,vale2,tpico2,tvale2,h2]=ffilpic(pico,vale,tpico,tvale,h,
ppic);
clc;
disp('procurando steps...');
[a,b]=fred(a0,b0,p13,p14,p15);

```

```

b1=fmed(b,p23,p24);
b2=fslop(b1,a,p33,p34);
b3=fhslop(b2,a,p43,p44);
b4=b2-b3;
degraus=fps(a,b,b4,p53);
disp('steps encontrados. ');
%*****
subplot(3,1,1)
plot(a,b);
subplot(3,1,2)
plot(a,b1,a,b2);
subplot(3,1,3)
plot(a,b3,a,b4);
pause;
subplot(2,1,1);
plot(a,b);
title('b = pontos orig. ');
subplot(2,1,2);
plot(a,b1);
title('b1 = output median filter');
xlabel('t(s)');
pause;
plot(a,b2);
title('b2 = output slop filter');
xlabel('t(s)');
pause;
plot(a,b3);
title('b3 = output hor slop filter');
xlabel('t(s)');
pause;
plot(a,b4);
title('b4 = b2-b3');
xlabel('t(s)');
pause;
clc;
salva = input('deseja salvar arquivo de vetores (s/n)? ','s');
clc;
if salva == 's'
    disp('espere...');
    filename = 'out1';
    mat1=[a;b;b1;b2;b3;b4];
    wklwrite(filename,mat1);
    clc;
    disp('out1.wkl salvo. ');
else
    disp('arq. nao foi salvo. ');
end
end

```

```

%*****
subplot (3,1,1)
plot(a,b);
subplot (3,1,2)
plot(ar,br1,ar,br2);
subplot (3,1,3)
plot(ar,br3);
pause;
subplot(2,1,1);
plot(a,b);
title('b = pontos orig.');
```

```

subplot(2,1,2);
plot(ar,br1);
title('b1 = output median filter');
xlabel('t(s)');
pause;
plot(ar,br2);
title('b2 = output slop filter');
xlabel('t(s)');
pause;
plot(ar,br3);
title('b3 = output hor slop filter');
xlabel('t(s)');
pause;
clc;
salva = input('deseja salvar arquivo de vetores (s/n)? ','s');
clc;
if salva == 's'
    disp('espere...');
    filename = 'out1';
    mat1=[a;b;ar,br1;br2;br3;br4];
    wklwrite(filename,mat1);
    clc;
    disp('out1.wkl salvo.');
```

```

else
    disp('arq. nao foi salvo.');
```

```

end
%*****

```

APENDICE B: PROGRAMA NORM_DIAG

```

function norm_diag(nn)
questao1 = questdlg('Escolha Condição', ...
    'Arquivos a serem carregados', ...
    'Condição Referência (CR)', 'Condição
Diagnóstico (CD)', 'Condição Diagnóstico (CD)');
switch questao1,
    case 'Condição Referência (CR)',
        % definindo se o arquivo é abertura ou fechamento
        questao5 = questdlg('É abertura ou fechamento ', ...
            'Arquivo a ser carregado', ...
            'Abertura', 'Fechamento', 'Fechamento');
        switch questao5,
            case 'Abertura',
                cam = cd;
                [arg_in,path_in] = uigetfile ('Out2*.*','escolha o
arquivo de abertura e aguarde ...',50,50);
                if ~ischar(arg_in)
                    warndlg('O nome do arquivo não foi fornecido.')
                    return
                else
                    cd( path_in);
                    pwd;
                    cam1 = cd;
                    nome_arq = arg_in;
                    mm1 = dlmread(nome_arq, ' ',0,1);
                    mm1n = [mm1(13) mm1(9) mm1(3) mm1(7) mm1(14) mm1(10)];
                    FNA1 = 5/mm1n(1);
                    FNA2 = 5/mm1n(2);
                    FNA3 = 5/mm1n(3);
                    FNA4 = 5/mm1n(4);
                    FNA5 = 5/mm1n(5);
                    FNA6 = 5/mm1n(6);
                    FNA = [FNA1 FNA2 FNA3 FNA4 FNA5 FNA6];
                cd (cam)
                save FNA.txt FNA -ascii
                end
            case 'Fechamento',
                cam = cd;

```

```

[arq_in,path_in] = uigetfile ('Out1*.*','escolha o
arquivo de fechamento e aguarde ...',50,50);
if ~ischar(arq_in)
    warndlg('O nome do arquivo não foi fornecido.')
    return
else
    cd( path_in);
    pwd;
    cam1 = cd;
    nome_arq = arq_in;
    mm12 = dlmread(nome_arq, ' ',0,1);
    mm12n = [mm12(5) mm12(6) mm12(7) mm12(8) mm12(12)
mm12(3) mm12(13) mm12(9)];
    FNF1 = 5/mm12n(1);
    FNF2 = 5/mm12n(2);
    FNF3 = 5/mm12n(3);
    FNF4 = 5/mm12n(4);
    FNF5 = 5/mm12n(5);
    FNF6 = 5/mm12n(6);
    FNF7 = 5/mm12n(7);
    FNF8 = 5/mm12n(8);
    FNF = [FNF1 FNF2 FNF3 FNF4 FNF5 FNF6 FNF7 FNF8];
    cd (cam)
        save FNF.txt FNF -ascii
    end
end
case 'Condição Diagnóstico (CD)',
questao2 = questdlg('É abertura ou fechamento ', ...
    'Arquivo a ser carregado', ...
    'Abertura', 'Fechamento', 'Fechamento');
switch questao2,
    case 'Abertura',
        load 'FNA.txt'
        FNA1 = FNA(1);
        FNA2 = FNA(2);
        FNA3 = FNA(3);
        FNA4 = FNA(4);
        FNA5 = FNA(5);
        FNA6 = FNA(6);
        cam = cd;
        [arq_in1,path_in1] = uigetfile ('Out2*.*','escolha o
arquivo de abertura e aguarde ...',50,50);
        if ~ischar(arq_in1)
            warndlg('O nome do arquivo não foi fornecido.')
            return
        else
            cd( path_in1);

```

```

pwd;
cam1 = cd;
nome_arq1 = arq_in1;
mm11 = dlmread(nome_arq1, ' ', 0, 1);
mm11n = [mm11(13) mm11(9) mm11(3) mm11(7) mm11(14)
mm11(10)];
    out1a_medidas = mm11n(1)* FNA1;
    out2a_medidas = mm11n(2)* FNA2;
    out3a_medidas = mm11n(3)* FNA3;
    out4a_medidas = mm11n(4)* FNA4;
    out5a_medidas = mm11n(5)* FNA5;
    out6a_medidas = mm11n(6)* FNA6;
    out2abert_medidas = [out1a_medidas out2a_medidas
out3a_medidas out4a_medidas out5a_medidas out6a_medidas];
    cd (cam)
save out2abert_medidas.txt out2abert_medidas -ascii
end
case 'Fechamento',
    load 'FNF.txt'
    FNF1 = FNF(1);
    FNF2 = FNF(2);
    FNF3 = FNF(3);
    FNF4 = FNF(4);
    FNF5 = FNF(5);
    FNF6 = FNF(6);
    FNF7 = FNF(7);
    FNF8 = FNF(8);
    cam = cd;
    [arq_in1,path_in1] = uigetfile ('Out1*.*','escolha o
arquivo de fechamento e aguarde ...',50,50);
    if ~ischar(arq_in1)
        warndlg('O nome do arquivo não foi fornecido.')
        return
    else
        cd( path_in1);
        pwd;
        cam1 = cd;
        nome_arq1 = arq_in1;
        mm121 = dlmread(nome_arq1, ' ', 0, 1);
        mm121n = [mm121(5) mm121(6) mm121(7) mm121(8) mm121(12)
mm121(3) mm121(13) mm121(9)];
        out1f_medidas = mm121n(1)*FNF1;
        out2f_medidas = mm121n(2)*FNF2;
        out3f_medidas = mm121n(3)*FNF3;
        out4f_medidas = mm121n(4)*FNF4;
        out5f_medidas = mm121n(5)*FNF5;
        out6f_medidas = mm121n(6)*FNF6;

```

```

out7f_medidas = mm121n(7)*FNF7;
out8f_medidas = mm121n(8)*FNF8;
out1fecha_medidas = [out1f_medidas out2f_medidas
out3f_medidas out4f_medidas out5f_medidas out6f_medidas
out7f_medidas out8f_medidas];
cd (cam)
save out1fecha_medidas.txt out1fecha_medidas -ascii
end
end
questao3 = questdlg('Análise via fuzzy, informe se é: ',
'Favor responder a questão ', ...
'Abertura', 'Fechamento', 'Fechamento');
switch questao3,

case 'Abertura',

aa = readfis('Fuzabert');
out = evalfis([out2abert_medidas],aa);
fuzzy
saidaevalfis = out;
entradadiag = [ saidaevalfis ];
[diag, diagp] = le_arquivo_diag2(entradadiag);
[ns2,sac2,vetdiag2] = loc_vet2(diagp);
vet_diag2 = strcat(vetdiag2, ' =',sac2)'
case 'Fechamento',
aa = readfis('Fuzfech');
out = evalfis([out1fecha_medidas],aa);
saidaevalfis = out;
entradadiag = [ saidaevalfis ];
[diag, diagp] = le_arquivo_diag1(entradadiag);
[ns1,sac1,vetdiag1] = loc_vet1(diagp);
vet_diag1 = strcat(vetdiag1, ' =',sac1)'
end
end
end

```

APÊNDICE C – PROGRAMA FUZZY.FIS

```
Fuzabert.fis
[System]
Name='Fuzabert'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=6
NumOutputs=6
NumRules=44
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

```
[Input1]
Name='TM'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3.008 4.016]
MF2='NM':'trimf',[3.008 4.016 4.488]
MF3='NP':'trimf',[4.016 4.488 5]
MF4='OK':'trimf',[4.488 5 5.512]
MF5='PP':'trimf',[5 5.512 5.984]
MF6='PM':'trimf',[5.512 5.984 7.008]
MF7='PG':'trapmf',[5.984 7.008 10 10]
```

```
[Input2]
Name='PM'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3.008 4.016]
MF2='NM':'trimf',[3.008 4.016 4.488]
MF3='NP':'trimf',[4.016 4.488 5]
MF4='OK':'trimf',[4.49 5 5.51]
MF5='PP':'trimf',[5 5.512 5.984]
MF6='PM':'trimf',[5.512 5.984 7.008]
MF7='PG':'trapmf',[5.984 7.008 10 10]
```

```
[Input3]
Name='PCC'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3.008 4.016]
```

MF2='NM':trimf,[3.008 4.016 4.488]
 MF3='NP':trimf,[4.016 4.488 5]
 MF4='OK':trimf,[4.49 5 5.51]
 MF5='PP':trimf,[5 5.512 5.984]
 MF6='PM':trimf,[5.512 5.984 7.008]
 MF7='PG':trapmf,[5.984 7.008 10 10]
 [Input4]
 Name='PCD'
 Range=[0 10]
 NumMFs=7
 MF1='NG':trapmf,[0 0 3.008 4.016]
 MF2='NM':trimf,[3.008 4.016 4.488]
 MF3='NP':trimf,[4.016 4.488 5]
 MF4='OK':trimf,[4.488 5 5.512]
 MF5='PP':trimf,[5 5.512 5.984]
 MF6='PM':trimf,[5.512 5.984 7.008]
 MF7='PG':trapmf,[5.984 7.008 10 10]
 [Input5]
 Name='PSC'
 Range=[0 10]
 NumMFs=7
 MF1='NG':trapmf,[0 0 3.008 4.016]
 MF2='NM':trimf,[3.008 4.016 4.488]
 MF3='NP':trimf,[4.016 4.488 5]
 MF4='OK':trimf,[4.49 5 5.51]
 MF5='PP':trimf,[5 5.512 5.984]
 MF6='PM':trimf,[5.512 5.984 7.008]
 MF7='PG':trapmf,[5.984 7.008 10 10]
 [Input6]
 Name='DP'
 Range=[0 10]
 NumMFs=7
 MF1='NG':trapmf,[0 0 3 4]
 MF2='NM':trimf,[3 4 4.5]
 MF3='NP':trimf,[4 4.5 5]
 MF4='OK':trimf,[4.5 5 5.5]
 MF5='PP':trimf,[5 5.5 6]
 MF6='PM':trimf,[5.5 6 7]
 MF7='PG':trapmf,[6 7 10 10]
 [Output 1]
 Name='CL'
 Range=[0 10]
 NumMFs=7
 MF1='NG':trapmf,[0 0 3.008 4.016]
 MF2='NM':trimf,[3.008 4.016 4.488]
 MF3='NP':trimf,[4.016 4.488 5]
 MF4='OK':trimf,[4.49 5 5.51]

MF5='PP':'trimf',[5 5.512 5.984]
MF6='PM':'trimf',[5.512 5.984 7.008]
MF7='PG':'trapmf',[5.984 7.008 10 10]

[Output2]

Name='OBS'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3.008 4.016]
MF2='NM':'trimf',[3.008 4.016 4.488]
MF3='NP':'trimf',[4.016 4.488 5]
MF4='OK':'trimf',[4.488 5 5.512]
MF5='PP':'trimf',[5 5.512 5.984]
MF6='PM':'trimf',[5.512 5.984 7.008]
MF7='PG':'trapmf',[5.984 7.008 10 10]

[Output3]

Name='OBH'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3.008 4.016]
MF2='NM':'trimf',[3.008 4.016 4.488]
MF3='NP':'trimf',[4.016 4.488 5]
MF4='OK':'trimf',[4.488 5 5.512]
MF5='PP':'trimf',[5 5.512 5.984]
MF6='PM':'trimf',[5.512 5.984 7.008]
MF7='PG':'trapmf',[5.984 7.008 10 10]

[Output4]

Name='FEL'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3.008 4.016]
MF2='NM':'trimf',[3.008 4.016 4.488]
MF3='NP':'trimf',[4.016 4.488 5]
MF4='OK':'trimf',[4.488 5 5.512]
MF5='PP':'trimf',[5 5.512 5.984]
MF6='PM':'trimf',[5.512 5.984 7.008]
MF7='PG':'trapmf',[5.984 7.008 10 10]

[Output5]

Name='PCD'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3.008 4.016]
MF2='NM':'trimf',[3.008 4.016 4.488]
MF3='NP':'trimf',[4.016 4.488 5]
MF4='OK':'trimf',[4.488 5 5.512]
MF5='PP':'trimf',[5 5.512 5.984]
MF6='PM':'trimf',[5.512 5.984 7.008]

MF7='PG':'trapmf',[5.984 7.008 10 10]

[Output6]

Name='PSC'

Range=[0 10]

NumMFs=7

MF1='NG':'trapmf',[0 0 3.008 4.016]

MF2='NM':'trimf',[3.008 4.016 4.488]

MF3='NP':'trimf',[4.016 4.488 5]

MF4='OK':'trimf',[4.488 5 5.512]

MF5='PP':'trimf',[5 5.512 5.984]

MF6='PM':'trimf',[5.512 5.984 7.008]

MF7='PG':'trapmf',[5.984 7.008 10 10]

[Rules]

1 0 0 0 0 0, 1 0 0 0 0 0 (1) : 2

2 0 0 0 0 0, 2 0 0 0 0 0 (1) : 2

3 0 0 0 0 0, 3 0 0 0 0 0 (1) : 2

4 0 0 0 0 0, 4 0 0 0 0 0 (1) : 2

5 0 0 0 0 0, 5 0 0 0 0 0 (1) : 2

6 0 0 0 0 0, 6 0 0 0 0 0 (1) : 2

7 0 0 0 0 0, 7 0 0 0 0 0 (1) : 2

4 4 0 0 0 0, 0 4 0 0 0 0 (1) : 1

5 5 0 0 0 0, 0 5 0 0 0 0 (1) : 1

6 5 0 0 0 0, 0 6 0 0 0 0 (1) : 1

7 5 0 0 0 0, 0 6 0 0 0 0 (1) : 1

0 4 0 0 0 4, 0 0 4 0 0 0 (1) : 1

0 3 0 0 0 4, 0 0 4 0 0 0 (1) : 1

0 2 0 0 0 4, 0 0 4 0 0 0 (1) : 1

0 5 0 0 0 5, 0 0 5 0 0 0 (1) : 1

0 4 4 0 0 0, 0 0 0 4 0 0 (1) : 1

0 5 5 0 0 0, 0 0 0 4 0 0 (1) : 1

0 6 6 0 0 0, 0 0 0 6 0 0 (1) : 2

0 0 0 0 1 0, 0 0 0 0 0 1 (1) : 2

0 0 0 0 2 0, 0 0 0 0 0 2 (1) : 2

0 0 0 0 3 0, 0 0 0 0 0 3 (1) : 2

0 0 0 0 4 0, 0 0 0 0 0 4 (1) : 2

0 0 0 0 5 0, 0 0 0 0 0 5 (1) : 2

0 0 0 0 6 0, 0 0 0 0 0 6 (1) : 2

0 0 0 0 7 0, 0 0 0 0 0 7 (1) : 2

5 6 0 0 0 0, 0 6 0 0 0 0 (1) : 1

6 7 0 0 0 0, 0 7 0 0 0 0 (1) : 1

7 7 0 0 0 0, 0 7 0 0 0 0 (1) : 1

6 6 0 0 0 0, 0 6 0 0 0 0 (1) : 1

0 0 0 1 0 0, 0 0 0 0 1 0 (1) : 2

0 0 0 2 0 0, 0 0 0 0 2 0 (1) : 2

0 0 0 3 0 0, 0 0 0 0 3 0 (1) : 2

0 0 0 4 0 0, 0 0 0 0 4 0 (1) : 2

0 0 0 5 0 0, 0 0 0 0 5 0 (1) : 2

```

000600,000060(1):2
000700,000070(1):2
076000,000600(1):2
077000,000700(1):2
070005,005000(1):1
070006,006000(1):1
070007,007000(1):1
050006,006000(1):1
050007,007000(1):1
060007,007000(1):1

```

Fuzfech.fis

[System]

Name='Fuzfech'

Type='mamdani'

Version=2.0

NumInputs=8

NumOutputs=6

NumRules=41

AndMethod='min'

OrMethod='max'

ImpMethod='min'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='centroid'

[Input1]

Name='PCA'

Range=[0 10]

NumMFs=7

MF1='NG': 'trapmf',[0 0 3 4]

MF2='NM': 'trimf',[3 4 4.5]

MF3='NP': 'trimf',[4 4.5 5]

MF4='OK': 'trimf',[4.5 5 5.5]

MF5='PP': 'trimf',[5 5.5 6]

MF6='PM': 'trimf',[5.5 6 7]

MF7='PG': 'trapmf',[6 7 10 10]

[Input2]

Name='TAC'

Range=[0 10]

NumMFs=7

MF1='NG': 'trapmf',[0 0 3 4]

MF2='NM': 'trimf',[3 4 4.5]

MF3='NP': 'trimf',[4 4.5 5]

MF4='OK': 'trimf',[4.5 5 5.5]

MF5='PP': 'trimf',[5 5.5 6]

MF6='PM': 'trimf',[5.5 6 7]

MF7='PG': 'trapmf',[6 7 10 10]

```
[Input3]
Name='DPA'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]
MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]
[Input4]
Name='PM'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]
MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]
[Input5]
Name='TM'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]
MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]
[Input6]
Name='PCC'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]
MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]
[Input7]
Name='PSC'
Range=[0 10]
```

```

NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]
MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]
[Input8]
Name='DP'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]
MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]
[Output1]
Name='CT'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]
MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]
[Output2]
Name='OBS'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]
MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]
[Output3]
Name='OBH'
Range=[0 10]
NumMFs=7
MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]

```

MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
 MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
 MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
 MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
 MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]

[Output4]

Name='FEL'

Range=[0 10]

NumMFs=7

MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
 MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]
 MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
 MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
 MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
 MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
 MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]

[Output5]

Name='PSC'

Range=[0 10]

NumMFs=7

MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
 MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]
 MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
 MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
 MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
 MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
 MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]

[Output6]

Name='TM'

Range=[0 10]

NumMFs=7

MF1='NG':'trapmf',[0 0 3 4]
 MF2='NM':'trimf',[3 4 4.5]
 MF3='NP':'trimf',[4 4.5 5]
 MF4='OK':'trimf',[4.5 5 5.5]
 MF5='PP':'trimf',[5 5.5 6]
 MF6='PM':'trimf',[5.5 6 7]
 MF7='PG':'trapmf',[6 7 10 10]

[Rules]

1 0 1 0 0 0 0 0, 1 0 0 0 0 0 (1) : 2
 2 0 2 0 0 0 0 0, 2 0 0 0 0 0 (1) : 2
 3 0 3 0 0 0 0 0, 3 0 0 0 0 0 (1) : 2
 4 0 4 0 0 0 0 0, 4 0 0 0 0 0 (1) : 2
 5 0 5 0 0 0 0 0, 5 0 0 0 0 0 (1) : 2
 6 0 6 0 0 0 0 0, 6 0 0 0 0 0 (1) : 2
 7 0 7 0 0 0 0 0, 7 0 0 0 0 0 (1) : 2
 0 0 0 4 0 0 0 4, 0 0 4 0 0 0 (1) : 2

00050005,004000(1):1
00060006,006000(1):1
00060007,007000(1):1
00030005,004000(1):1
00020005,004000(1):1
00010005,004000(1):1
00040400,000400(1):2
00050500,000400(1):1
00060500,000400(1):1
00070500,000500(1):1
00050600,000600(1):1
00060700,000700(1):1
00060600,000600(1):1
00070700,000700(1):1
00001000,000001(1):2
00002000,000002(1):2
00003000,000003(1):2
00004000,000004(1):2
00005000,000005(1):2
00006000,000006(1):2
00007000,000007(1):2
00000010,000010(1):2
00000020,000020(1):2
00000030,000030(1):2
00000040,000040(1):2
00000050,000050(1):2
00000060,000060(1):2
00000070,000070(1):2
44000000,400000(1):1
04000000,040000(1):1
05000000,040000(1):1
06000000,050000(1):1
07000000,070000(1):1

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

/1/ HAYNES, H.D. Aging and service wear of electric motor-operated valves used in engineered safety-feature systems of nuclear power plants, NUREG/CR-4234/vol.2, august/1989.

/2/ ATALLA, D.L. Early detection and diagnosis of equipment degradation - Angra I Practices and Goals, In: Technical Committee Meeting Report, IAEA-J4-TC698, 20-24 November, Vienna: IAEA, 1995.

/3/ UPADHYAYA, B. R.; Bannks J.E.; Erbay A.S. Life prediction of plant components, may 1997, Knoxville - TN. Proceedings of Maintenance and Reliability Conference - MARCON 97, Knoxville-Tennessee, USA, 1997.

/4/ KUEHN, S. Valve testing, diagnostics and maintenance 1. Motor-Operated Valve testing and diagnostics. Power Engineering, january 1994.

/5/ DICQUEMARE, P. Improved diagnostics is the key to predictive maintenance of valves. Nuclear Engineering, Vol. 42, N. 513, april 1997.

/6/ CHOI, Y. A. Application of reliability-centered maintenance to boiling water reactor emergency core cooling systems fault-tree analysis. Nuclear Technology Vol. III, july 1995.

/7/ COOPER, S. E.; Lofgren E.V.; Samanta P.K.; Wong S.M. Dependent failure analysis of NPP data bases. Nuclear Engineering and Design, 142, 137-153, 1993.

/8/ KIRCHSTEIGER, C. Nonparametric estimation of time-dependent failure rates for probabilistic risk assessment. Reliability Engineering and System Safety, 44, 1-9, 1994.

/9/ CHARBONNEAU, A.G. Update on field signature testing of motor-operated valve mechanical and electrical degradations. T. American Nuclear Society, 49, 383-384, june 1985.

/10/ NIKO, M.; Slavo S.; Emil, H. Cost optimization in maintenance planning. In: Maintenance and Reliability Conference, may 1999, Knoxville TN USA. Proceedings of MARCON, Knoxville TN USA, 1999.

/11/ CHOI, Y.A.; Feults M. A. Assessment of MOV stroke time testing as a condition-directed PM task. Reliability Engineering and System Safety, 48, 85-90, 1995.

/12/ KUECK, J.D. An investigation of magnesium rotors in motor-operated valve actuators. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.3, No. 1, march 1988.

/13/ BRUCK, P.M. Seismic qualification of motor-operated valves - alternate approach. Nuclear Engineering and Design, 181, 157-162, 1998.

/14/ BABAR, A.; Saraf, R.; Rao, V. Reliability improvement in electric motor operated valves. Reliability Engineering and System Safety, 23: (2) 159-161, 1988.

/15/ BAUERNFEIND, V.; Olma B.J.; Sunder R.; Wach D. Development of diagnostic methods for on-line condition monitoring of primary system components. Kerntechnik 58: (2) 84-97, april 1993.

/16/ Nuclear Regulatory Commission. *Safety-related motor-operated valve (MOV) testing and surveillance*. June 1989. (10 CFR 50.54(f), Generic Letter 89-10).

/17/ Nuclear Regulatory Commission. *Results of the public workshops*. June 1990. (Generic Letter 89-10, Supplement 1).

- /18/ Nuclear Regulatory Commission. *Availability of program descriptions*. August 1990. (Generic Letter 89-10, Supplement 2).
- /19/ Nuclear Regulatory Commission. *Consideration of the results of NRC-sponsored tests of motor-operated valves*. October 1990. (Generic Letter 89-10, Supplement 3).
- /20/ Nuclear Regulatory Commission. *Consideration of valve mispositioning in boiling water reactors*. February 1992. (Generic Letter 89-10, Supplement 4).
- /21/ Nuclear Regulatory Commission. *Inaccuracy of motor-operated valve diagnostic equipment*. June 1993. (Generic Letter 89-10, Supplement 5).
- /22/ Nuclear Regulatory Commission. *Information on schedule and grouping, and staff response to additional public questions*. March 1994. (Generic Letter 89-10, Supplement 6).
- /23/ Nuclear Regulatory Commission. *Consideration of valve mispositioning in pressurized-water reactors*. January 1996. (Generic Letter 89-10, Supplement 7).
- /24/ TIBOR, S. Motor-operated valves engineered reliability (MOVER) program in Nuclear Power Plants., *Transactions American Nuclear Society*, 49: 386-389, June 1985.
- /25/ DAM, A. S. The impact of valves on plant operations and power availabilities: problems and solutions. *Transactions American Nuclear Society*, 48: 381-382, June 1985.
- /26/ BEEBE, R. Economic justification of condition monitoring. In: *Maintenance and Reliability Conference*, May, 1999, Knoxville TN USA. *Proceedings of MARCON*, Knoxville TN USA, 1999.
- /27/ MUKOPADHYAY, S.; Chauduri S. A feature-based approach to monitor motor-operated valves used in Nuclear Power Plants. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 42, December 1995.
- /28/ KEVAN, P. H. The binomial failure rate mixture model for common cause failure data from the nuclear industry. *Appl. Statist.*, 47, Part 1, pp. 49-61, Royal Statistical Society, 1998.
- /29/ TAKESHIMA, K.; Higashikawa, Y.; Koike, M. Development of degradation prediction technology for motor-operated valves. In: *Conference on Nuclear Engineering ICON9*. *Proceedings of 9th International ICON9*. Nice, France, April 8-12, 2001.
- /30/ CARNEIRO, A. L. G.; da Silva, A. A.; Siniscalchi, M.; Ferreira, W. Predictive maintenance program for motor-operated valves at Angra I Nuclear Power Plant. In: *Maintenance and Reliability Conference*, May, 1999, Knoxville TN USA. *Proceedings of MARCON*, Knoxville TN USA, 1999.
- /31/ CARNEIRO, A. L. G.; da Silva, A. A.; Upadhyaya, B.R. Development of an integrated condition monitoring system for motor-operated valves for Brazilian Nuclear Power Plants. In: *Maintenance and Reliability Conference*, May, 2001, Gatlinburg TN USA. *Proceedings of MARCON*, Gatlinburg TN USA, 2001.
- /32/ HAYNES, H.D. Application of signature analysis for determining the operational readiness of motor-operated valves under blowdown test conditions. *Nuclear Engineering and Design*, 118, 1990.
- /33/ Nuclear Regulatory Commission. *Accuracy of Motor Operated Valve Diagnostic Equipment Manufactured by Liberty Technologies*. IN-93-01, 1993.
- /34/ THIBAUT, C. Advanced valve motor-operated diagnostic system. In: *American Society of Mechanical Engineering and Nuclear Regulatory Commission Symposium on: In Service Testing of Pumps and Valves*. Washington D.C., August 1-3, 1989.

- /35/ CHAI, J.; Lyon R. H. Determination of component motions in a motor-operated valve using housing vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 10(2), 113-123, march 1996.
- /36/ LERCH, C. A.; Lyon R.H. A harmonic tracking technique for recovery of gear motion from non-stationary vibration signal. In: *Design Engineering Technical Conferences*, Vol.84-1,1995.
- /37/ Siemens AG, Power Generation Group (KWU), "Valve Performance Concept for Motor-Operated Valves", KWU-NDM4/1995.
- /38/ JOSHI, B.D.; Upadhyaya, B.R. Integrated software tool automates MOV diagnosis. *Power Engineering*, 45, abril 1996.
- /39/ SNOWDEN, S.A.; Upadhyaya, B.R. Automated diagnosis of motor-operated valves. In: *Maintenance and Reliability Conference*, may, 1997, Knoxville TN USA. *Proceedings of MARCON*, Knoxville TN USA, 1997.
- /40/ ALSAMMARE, A. Degraded voltage issues of AC motor operated valves in nuclear generating stations. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 41, N. 4, august 1994.
- /41/ BARLOW, R.T.; Hill, R.A.; McIntire, D. C.; O'Brein, J.F. Probabilistic evaluation of failure modes leading to the mispositioning of certain ECCS motor operated valves in Westinghouse NSSS. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, N.2, march/april,1978.
- /42/ BAXTER, F. D. The dangers of bypassing thermal overload relays in nuclear power motor operated valve circuits. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 6, november 1990.
- /43/ Institute of Nuclear Power Operations (INPO). Report 83-037.
- /44/ PEN-TUNG, S. A. *Fundamentals of Alternating-Current Machines*. Mc Graw Hill Book Company.
- /45/ SLEMON, G.R.; Straughen, A. *Electric Machines*. Addison-Wesley Publishing Company.
- /46/ SAY, M. G. *Alternating Current Machines*. Heriot-Watt - University of Edinburgh, Fifth Edition.
- /47/ KOSTENKO M.; Piotrovsky, L. *Electrical Machines*. Foreign Languages Publishing House, Moscow.
- /48/ MATLAB – *The Language of Technical Computing*. The Math Works, Inc., 1996.
- /49/ CARNEIRO, A L. G.; da Silva, A. A.; de Andrade, M. T. C. Sistema de monitoração e diagnóstico de válvula moto-operada, utilizando lógica nebulosa. No: XII Encontro de Física de Reatores ENFIR, Rio de Janeiro, outubro 2000. *Proceedings do XII Encontro de Física de Reatores ENFIR*, Rio de Janeiro, 2000.
- /50/ CARNEIRO, A. L. G.; da Silva, A. A.; Ting, D. K. S.; Upadhyaya, B. R. Detecção de falhas em válvulas moto-operadas, utilizando transformada de wavelet. In: INAC, Rio de Janeiro, agosto 2002, Brasil. *Proceedings of International Nuclear Atlantic Conference*, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- /51/ Fuzzy Logic Toolbox For Use With MATLAB. User's Guide, The MathWorks, Inc., april 1997.
- /52/ Wavelet Toolbox For Use With MATLAB. User's Guide, The MathWorks, Inc., march 1996.

- /53/ LEVINE, R.I.; Drang, D.E.; Barry, E. *Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas*. São Paulo: McGraw-Hill, 1988.
- /54/ HARMON, P.; King, D. *Sistemas Especialistas - A Inteligência Artificial Chega ao Mercado*. Editora Campos, 1988.
- /55/ WATERMAN, D. *A Guide to Expert Systems*. Editora Addison-Wesley, 1986.
- /56/ TZAFESTAS, S.G. *System Fault Daignosis Using The Knowledge-Based Methodology in Dynamic Systems: Theory and Applications*. Ed. Prentice -Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- /57/ GIARRATANO, J.; Riley, G. *Expert Systems, Principles and Programing*. PWS Publishing Company, Boston, 1994.
- /58/ KEUNG-CHI, Ng.; Abramson, B. Uncertainty Management in Expert System. IEEE Expert, abril 1990.
- /59/ DURKIN, J. *Expert Systems, Design and Development*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1994.
- /60/ BISC: The Berkeley Initiative in Soft Computing, dirigida pelo Prof. Lofty A. Zadeh da Universidade da California, hospeda a página desenvolvida por Dr. Masoud kravesh, 2002. <http://www.cs.berkeley.edu/~zadeh/>. Último acesso em 11 de abril de 2003.
- /61/ PERRY, T.S. Lotfi A Zadeh, The inventor of fuzzy logic. IEEE Spectrum, june/1995.
- /62/ Zadeh, L. A. Fuzzy sets. Information and control, Vol. 8, pp 338-353. New York, NY, Academic Press, 1965.
- /63/ BOOTH, A.; Carroll, W. J. T. An investigation into the use of expert systems for system-wide diagnostics. IEEE Transactions on Nuclear Science, february 1987.
- /64/ SHAW, I.S.; Simões, M. G. *Controle e Modelagem Fuzzy*. São Paulo, Edgard Blucher, 1999.
- /65/ ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. IEEE Transactions on Systems and Cybernetics, Vol. SMC-No.1, january 1973.
- /66/ LOVE, P.L.; Simaan, M. Automatic recognition of primitive changes in manufacturing process signals. Pattern Recognition, Vol. 21, No. 4, pp. 333-342, 1988.
- /67/ DA SILVA, A. A.; Upadhyaya, B. R. Nuclear Power Plant monitoring using wavelet analysis and data visualisation. In: Maintenance and Reliability Conference, MARCON, may, 1999, Knoxville TN USA. Proceedings of MARCON, Knoxville TN USA, 1999.
- /68/ PENHA, R. M. L.; Da Silva, A. A.; Ting, D. K. S.; de Oliveira, J. M. Análise de sinais transientes aplicando a transformada de *wavelet*. No XII Encontro de Física de Reatores ENFIR, Rio de Janeiro, outubro / 2000. Proceedings do XII Encontro de Física de Reatores ENFIR, Rio de Janeiro, outubro / 2000
- /69/ CHUI, C. K. *An Introduction to Wavelets*. Academic Press, Inc, 1992.
- /70/ DA SILVA, A. A. *An integrated aproach for plant monitoring and diagnosis using multiresolution wavelet analysis*. 1997. Tese (Doutorado) – The University of Tennessee, Knoxville, TN, EUA.

/71/ PENHA, R. M. L. *Análise de sinais em regime transiente aplicando a técnica de wavelet*. 1999. Tese (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Universidade de São Paulo, São Paulo.

/72/ MALLAT, S. A theory for multi-resolution signal decomposition: The Wavelet Representation, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, N.07, July 1989.

/73/ STRANG, G.; Nguyen, T. *Wavelets And Filter Banks*. Wellesley – Cambridge Press, 1996.

/74/ DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia PA, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1992.