

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MICROELETRÔNICA

LEONARDO BISCH PICCOLI

**Desenvolvimento de um Sistema em Chip  
de processamento *online* para Manutenção  
Inteligente**

Tese apresentada como requisito parcial para a  
obtenção do grau de Doutor em Microeletrônica

Orientador: Prof. Dr. Tiago Roberto Balen  
Co-orientador: Prof. Dr. Renato Ventura Bayan  
Henriques

Porto Alegre  
2018

## CIP — CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Piccoli, Leonardo Bisch

Desenvolvimento de um Sistema em Chip de processamento *online* para Manutenção Inteligente / Leonardo Bisch Piccoli. – Porto Alegre: PGMICRO da UFRGS, 2018.

146 f.: il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Microeletrônica, Porto Alegre, BR-RS, 2018. Orientador: Tiago Roberto Balen; Co-orientador: Renato Ventura Bayan Henriques.

1. Manutenção inteligente. 2. Processamento em tempo real. 3. Circuitos integrados. 4. Tolerância a falhas. 5. Verilog. 6. Microeletrônica. I. Balen, Tiago Roberto. II. Henriques, Renato Ventura Bayan. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Prof<sup>a</sup>. Jane Fraga Tutikian

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Celso Giannetti Loureiro Chaves

Diretora do Instituto de Informática: Prof<sup>a</sup>. Carla Maria Dal Sasso Freitas

Coordenadora do PGMICRO: Prof. Fernanda Gusmão de Lima Kastensmidt

Bibliotecária-chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

*Apressa-te a viver bem e pensa que cada dia é, por si só, uma VIDA!*

— SÊNECA



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Tiago Balen, pela orientação, dedicação, paciência e amizade durante todo o processo.

Aos professores doutores Renato Ventura Bayan Henriques e Carlos Eduardo Pereira, por todas as contribuições e pelo crédito dado ao desenvolvimento desta pesquisa.

À Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por ser o local necessário ao desenvolvimento deste trabalho.

À minha esposa Cristiane e filha Alice, pelo apoio emocional e espiritual.

Aos meus pais pelo auxílio durante o período de elaboração deste trabalho.

Aos membros do Grupo de Controle Automação e Robótica (GCAR) e ao Laboratório de Processamento de Sinais e Imagens (LaPSI) da UFRGS, pelo suporte acadêmico.

A todos os participantes da pesquisa, pela indispensável contribuição.



## RESUMO

Estratégias de monitoramento, baseadas na análise da condição de equipamentos utilizando ferramentas de processamento digital de sinais, inteligência artificial e tolerância a falhas, tornam-se cada vez mais necessárias nos processos industriais. As técnicas de manutenção inteligente conferem confiabilidade, disponibilidade e eficácia, e são estudadas, neste trabalho, no atual estado da arte. Porém, grande parte delas utiliza medidas com estados e parâmetros do processo que são dispendiosas e envolvem elevado tempo de amostragem e análise. O objetivo deste trabalho é desenvolver um novo sistema capaz de estimar a condição de saúde de um equipamento a partir das leituras de vibração e torque de sensores, e assim, viabilizar a detecção, predição e identificação de falhas *online* em atuadores elétricos utilizados em linhas de transporte de petróleo e/ou derivados. Para isso, foi desenvolvida uma técnica que, por meio de um dispositivo computacional, possibilita monitorar, considerando ruído e, de forma interativa, as variações dos parâmetros de um processo físico, tais como: falhas abruptas, incipientes e intermitentes. Isso corresponde às atividades de detecção, identificação de falhas e previsões sobre possíveis problemas que venham a surgir em consequência de pequenos desvios do comportamento normal do sistema. A metodologia empregada é baseada na estrutura do modelo *Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance* (OSA-CBM), que permite atuar nas seguintes camadas: 1) Aquisição de dados; 2) Manipulação de dados; 3) Monitoramento das condições; 4) Avaliação da saúde. O sistema compreende a análise simultânea das propriedades de tempo e frequência do sinal, extração de características e filtragem adaptativa. Uma bancada de testes foi utilizada para reproduzir algumas falhas típicas que podem causar degradação na operação de atuadores fabricados no mercado. O sistema foi denominado *Fault Detection System* (FDS) e é baseado em técnicas de processamento de sinais que tem como saída um sinal de resíduo ou erro quando na ocorrência de uma falha correspondente nos equipamentos monitorados. A versão em *software* do sistema foi registrada no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) nº "BR 51 2016 000863-6". Uma nova versão para prototipagem em *hardware* do FDS em conjunto com um bloco auxiliar denominado *Fault Detection Index* (FDI), que também é proposto neste trabalho, foi desenvolvido na linguagem *Verilog* e implementado utilizando uma biblioteca *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS) de 90 nm visando baixo consumo de energia ( $\approx 654 \mu W$ ), baixa utilização de área em silício ( $\approx 0,14 mm^2$ ) e processamento em tempo real. Os resultados demonstram a eficácia do método de detecção, diagnóstico e identificação de falhas apresentadas em atuadores elétricos empregados para controle de válvulas.

**Palavras-chave:** Manutenção inteligente. Processamento em tempo real. Circuitos integrados. Tolerância a falhas. Verilog. Microeletrônica.



## ABSTRACT

Monitoring strategies based on the analysis of equipment condition with information derived from digital signal processing, artificial intelligence and fault tolerance tools become increasingly necessary in industrial process. In this context, intelligent maintenance techniques provide reliability, availability and are being increasingly studied in the current state of the art researches. However, most of them are based on measurements with states and process parameters that are costly and involve high sampling and analysis time. In order to avoid this problem, this work presents a new system capable of estimating the health condition of an equipment from the vibration and torque measurements of sensors, thus enabling online detection, prediction and identification of faults in electric actuators. The developed system represents a technique that, by means of a computational device, allows to monitor the variations of the parameters of a physical process such as abrupt, incipient and intermittent failures. This corresponds to the activities of fault detection, identification and prediction of possible problems that may arise due to minor deviations of the normal behavior state of the system. The methodology is based on the Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance (OSA-CBM) framework, which allows to act in the following layers: 1) Data acquisition; 2) Data manipulation; 3) Condition monitoring; 4) Health assessment. The system comprises the simultaneous analysis of signal time and frequency properties, feature extraction and adaptive filtering. A testbench structure has been used to reproduce some typical faults that can cause degradation in the operation of the available commercial actuators. The results show the effectiveness of the method of detection, diagnosis and identification of faults that may occur in electric valves. The system is denominated Fault Detection System (FDS) and it is based on digital signal processing techniques producing a residue signal or error in the occurrence of a corresponding fault in the monitored equipment. A software version of the system was registered with the *Instituto Nacional da Propriedade Industrial* (INPI) nº "BR 51 2016 000863-6". A new version for hardware prototyping of FDS together with the Fault Detection Index (FDI), which is also proposed in this work, was using *Verilog* language and implemented in a 90 nm Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) library for low power consumption ( $\approx 654 \mu W$ ), low silicon area utilization ( $\approx 0.14 mm^2$ ) and real time processing. The results demonstrate the effectiveness of the method of detection, diagnosis and identification of faults present in electric actuators used for controlling fluidic valves.

**Keywords:** Intelligent Maintenance. Real Time Processing. Integrated Circuits. Fault Tolerance. Verilog. Microelectronics.



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Conversor Analógico/Digital
ARMA	<i>Auto-Regressive Moving Average</i>
ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuit</i>
AWT	<i>Adaptive Wavelet Transform</i>
BIST	<i>Built-in Self Test</i>
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i>
CD	<i>Correlation Dimension</i>
CDF	<i>Cohen Daubechies Feauveau</i>
CEITEC	Centro de Excelência em Tecnologia Eletrônica Avançada
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
CSN	<i>Chip Select Not</i>
CWT	<i>Continuous Wavelet Transform</i>
D/A	Conversor Digital / Analógico
DC	<i>Design Compiler</i>
DRC	<i>Design Rule Check</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i>
EEMD	<i>Ensemble Empirical Mode Decomposition</i>
EMD	<i>Empirical Mode Decomposition</i>
ERC	<i>Electrical Rule Check</i>
EWMA	<i>Exponentially Weighted Moving Average</i>
FB	<i>Filter Banks</i>
FD	<i>Fault Detection</i>
FDI	<i>Fault Detection Index</i>
FDS	<i>Fault Detection System</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GND	<i>Ground</i>
IC	<i>Integrated Circuit Compiler</i>
LFSR	<i>Linear Feedback Shift Register</i>
LMS	<i>Least Mean Squares Algorithm</i>
LS	<i>Lifting Scheme</i>

LVS     *Layout Versus Schematic*  
MISO    *Master In Slave Out*  
MOSI    *Master Out Slave In*  
OSA-CBM *Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance*  
PC       *Personal Computer*  
RC       *Encounter RTL Compiler*  
RTL      *Register Transfer Level*  
SANC     *Self-Adaptive Noise Cancellation*  
SCK      *Serial Clock*  
SDC      *Synopsys Design Constraints*  
SDI      *Serial Data In*  
SDO      *Serial Data Out*  
SOM      *Self-Organization Maps*  
SPI      *Serial Peripheral Interface*  
TPG      *Test Pattern Generation*  
VHDL     *VHSIC Hardware Description Language*  
VHSIC    *Very High Speed Integrated Circuit*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sum \frac{a}{b}$	Somatório da fração
$\alpha$	Nível 1 de decomposição em sub-bandas de frequência da DWT
$\beta$	Nível 2 de decomposição em sub-bandas de frequência da DWT
$\gamma$	Nível 3 de decomposição em sub-bandas de frequência da DWT
$\delta$	Nível 4 de decomposição em sub-bandas de frequência da DWT
$\mu$	Passo de adaptação do filtro adaptativo
$\lambda$	Fator de suavização
$\mu C$	Microcontrolador



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Principais estratégias de manutenção. ....	21
Figura 2.1 Relação entre defeito, falha, erro e falha sistêmica. ....	28
Figura 2.2 Falha e consequências.....	29
Figura 2.3 Arquitetura de um ambiente de injeção de falhas.....	30
Figura 2.4 Curva P-F de resistência à falha. ....	33
Figura 2.5 Diferentes técnicas de detecção e o seu correspondente custo de manutenção. ....	34
Figura 2.6 Esquema do sistema de manutenção inteligente tolerante a falhas. ....	35
Figura 2.7 O esquema do sistema hidráulico para o equipamento de teste experimental.	37
Figura 2.8 Histórico no domínio do tempo e espectro FFT sem restrição de estabilidade sob pressão piloto de 0,3 MPa.....	39
Figura 2.9 O sistema experimental do motor. ....	39
Figura 2.10 Representação gráfica do fluxo de sinal do sistema de detecção de falhas do motor.....	40
Figura 2.11 Sistema de teste de motor hidráulico de água.....	40
Figura 2.12 Gráficos no domínio tempo-frequência da CWT de Morlet do sinal simulado obtido pela modelagem do sinal de vibração em cinco condições do pistão.....	41
Figura 2.13 Esquemático da instalação do equipamento para teste de rolamento.....	42
Figura 2.14 Valor máximo normalizado com diferentes métodos de teste em rolamentos.....	42
Figura 2.15 Nove condições de falha do rolamento.....	43
Figura 2.16 Sinais de vibração para diferentes condições de degradação. ....	44
Figura 2.17 Método de filtragem de ruídos com algoritmos SANC e ANC.....	45
Figura 2.18 Espectro de frequência de sinais de falha simulados no transporte ferroviário.....	46
Figura 2.19 Espectros de frequência de sinais de ruído a diferentes velocidades.....	46
Figura 2.20 Configuração de <i>hardware</i> do sistema STFDOMS implementado. ....	48
Figura 2.21 Representação do modelo de sistemas para detecção de falhas no Simulink. ....	50
Figura 3.1 Primeiras etapas do CBM para manutenção inteligente.....	54
Figura 3.2 Arquitetura em <i>hardware</i> para o protocolo SPI.....	60
Figura 4.1 Evolução da produção de petróleo, por localização (terra e mar). ....	61
Figura 4.2 Transporte e armazenamento de petróleo e derivados. ....	62
Figura 4.3 Componentes de um típico terminal.....	64
Figura 4.4 Fluxograma simplificado da automação de um típico terminal.....	64
Figura 4.5 Redundância com válvulas em dutos.....	67
Figura 4.6 Componentes externos do atuador. ....	68
Figura 4.7 Detalhes construtivos dos atuadores.....	69
Figura 4.8 Conjunto de engrenagens satélite do atuador. ....	71
Figura 4.9 Conjunto defeituoso de engrenagens do estudo de caso.....	71
Figura 4.10 Diagrama de causa-efeito para identificar possíveis modos de falha no conjunto atuador-válvula. ....	72
Figura 4.11 Modelagem do atuador elétrico, válvula e tubulação. ....	73
Figura 4.12 Arquitetura do sistema embarcado para manutenção inteligente. ....	74

Figura 4.13	Arquitetura do circuito de predição com filtro adaptativo.....	75
Figura 5.1	Arquitetura conceitual do sistema nas camadas do OSA-CBM.....	79
Figura 5.2	Estrutura do sistema de detecção de falhas.....	80
Figura 5.3	Diagrama de blocos da estrutura LS.....	82
Figura 5.4	Arquitetura LS em <i>hardware</i> para <i>wavelet</i> 9/7.....	82
Figura 5.5	Diagrama de blocos do filtro adaptativo LMS.....	85
Figura 5.6	Arquitetura do FDS para síntese.....	87
Figura 5.7	Diagrama da pinagem do FDS.....	87
Figura 5.8	Implementação na configuração Galois de 8-bit do LFSR.....	88
Figura 5.9	Gerador de padrões de teste para o chip.....	88
Figura 5.10	Esquema de funcionamento do gerador de padrões de teste.....	89
Figura 5.11	Arquitetura do FDI para síntese.....	90
Figura 5.12	Arquitetura do chip FDS para predição de falhas com SPI.....	90
Figura 5.13	Arquitetura do chip FDS e FDI para predição de falhas com SPI.....	91
Figura 5.14	A estrutura geral com uma rede WirelessHART™.....	92
Figura 5.15	Configuração do projeto em rede <i>Modbus</i> .....	93
Figura 5.16	Chip para predição de falhas com interface SPI.....	94
Figura 5.17	Esquemático do chip para predição de falhas com interface SPI.....	94
Figura 5.18	Protocolo de comunicação com o chip.....	95
Figura 5.19	Procedimento para configuração do chip.....	97
Figura 6.1	Etapas de operação para a obtenção de resultados.....	100
Figura 6.2	Entradas e saídas da ferramenta <i>Design Compiler</i> .....	100
Figura 6.3	Visão de topo do chip de predição de falhas.....	101
Figura 6.4	Verificação da síntese lógica e validação da qualidade dos resultados.....	101
Figura 6.5	Entradas e saídas da ferramenta <i>IC Compiler</i> .....	102
Figura 6.6	Síntese física do chip de predição de falhas em 90 nm.....	103
Figura 6.7	Verificação da síntese física e validação da qualidade dos resultados.....	103
Figura 6.8	Posicionamento e roteamento das células.....	104
Figura 6.9	Distribuição da densidade de energia consumida.....	105
Figura 6.10	Estrutura da distribuição da árvore de relógio.....	105
Figura 6.11	Síntese física do chip de predição de falhas em 0,6 μm.....	110
Figura 6.12	Conexão do sistema com FPGA e microcontrolador.....	111
Figura 6.13	Atuador instrumentado na bancada de teste.....	114
Figura 6.14	Injeção de falhas com freio a disco.....	115
Figura 6.15	Engrenagens usadas nos testes para injeção de falhas.....	115
Figura 6.16	Localização dos sensores instalados no atuador elétrico.....	116
Figura 6.17	Espectro de frequência do acelerômetro em condições normais.....	117
Figura 6.18	Espectro de frequência do sensor de torque em condições normais.....	118
Figura 6.19	Espectro de frequência do sensor de torque com pressão de 100 kPa.....	118
Figura 6.20	Espectro de frequência do sensor de torque com pressão de 300 kPa.....	118
Figura 6.21	Espectro de frequência do acelerômetro para engrenagens desgastadas.....	119
Figura 6.22	Espectro de frequência do acelerômetro para engrenagens com dentes fraturados.....	119
Figura 6.23	Espectro de frequência do acelerômetro para engrenagens sem lubrificação.....	119
Figura 6.24	Interface <i>bash script</i> para configurar e executar macros.....	120
Figura 6.25	Interação entre o usuário e o sistema para os testes.....	121
Figura 6.26	Experimento de falha com 100 kPa no disco de freio sobre a válvula.....	123
Figura 6.27	Experimento de falha com 300 kPa no disco de freio sobre a válvula.....	124

Figura 6.28	Experimento de falha com engrenagem de dente desgastado. ....	125
Figura 6.29	Experimento de falha com engrenagem de dente fraturado. ....	127
Figura 6.30	Experimento de falha sem lubrificação nas engrenagens. ....	128
Figura 6.31	Experimento de falha sem lubrificação nas engrenagens. ....	129
Figura 6.32	Formas de diagnóstico extraído do histograma. ....	131



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Características das técnicas propostas. ....	25
Tabela 2.1	Principais características das estratégias clássicas de manutenção. ....	31
Tabela 2.2	Estado da arte das principais estratégias inteligentes. ....	52
Tabela 3.1	Algoritmo do filtro LMS. ....	57
Tabela 3.2	Representação de números no formato Q. ....	59
Tabela 3.3	Sinais utilizados no protocolo SPI mestre. ....	60
Tabela 4.1	Procedimentos operacionais de um típico terminal. ....	66
Tabela 4.2	Especificações do atuador elétrico modelo CSR6. ....	70
Tabela 5.1	Pinagem do chip com interface SPI. ....	94
Tabela 6.1	Análise de tempo do chip proposto. ....	106
Tabela 6.2	Área do chip implementado em 90 nm. ....	107
Tabela 6.3	Dissipação de energia do chip implementado em 90 nm. ....	107
Tabela 6.4	Circuitos digitais utilizados na síntese lógica. ....	109
Tabela 6.5	Dissipação de energia do chip implementado em 0,6 μm. ....	110
Tabela 6.6	Conexão entre os módulos de FPGA e microcontrolador. ....	112
Tabela 6.7	Ocupação do chip no dispositivo EP2C5T144C8. ....	113
Tabela 6.8	Ciclos realizados de testes experimentais. ....	117
Tabela 6.9	Comparativo de consumo aproximado de 50 válvulas para 15 ciclos diários. ....	132



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>1.1 Visão Geral dos Objetivos</b> .....	<b>24</b>
<b>1.2 Contribuições</b> .....	<b>24</b>
<b>1.3 Apresentação dos Capítulos</b> .....	<b>25</b>
<b>2 ESTADO DA ARTE EM TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1 Tolerância a Falhas</b> .....	<b>27</b>
2.1.1 Definições de Termos Empregados.....	28
2.1.2 Arquitetura de um Ambiente de Injeção de Falhas.....	29
<b>2.2 Técnicas de Manutenção</b> .....	<b>30</b>
2.2.1 Manutenção Baseada na Condição .....	31
2.2.2 Manutenção Inteligente.....	34
<b>2.3 Estado da Arte em Manutenção Inteligente</b> .....	<b>36</b>
2.3.1 Resumo do Estado da Arte.....	50
<b>3 REVISÃO DE TÉCNICAS E METODOLOGIAS</b> .....	<b>53</b>
<b>3.1 Métodos de Processamento Digital de Sinais</b> .....	<b>53</b>
3.1.1 Transformada Discreta de Wavelet .....	54
3.1.2 Extração de Energia .....	55
3.1.3 Filtro Adaptativo .....	56
<b>3.2 Sistemas de Tempo Real</b> .....	<b>58</b>
<b>3.3 Formato dos Dados de Dispositivos Digitais</b> .....	<b>58</b>
3.3.1 Notação de Ponto Fixo no Formato Q .....	58
<b>3.4 O Protocolo de Comunicação Serial SPI</b> .....	<b>59</b>
3.4.1 Arquitetura de <i>Hardware</i> do Protocolo SPI.....	60
<b>4 UTILIZAÇÃO DE VÁLVULAS NO MODAL DUTOVIÁRIO DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO</b> .....	<b>61</b>
<b>4.1 Oferta e Demanda de Petróleo</b> .....	<b>61</b>
<b>4.2 Transporte e Armazenamento de Petróleo e Derivados</b> .....	<b>62</b>
4.2.1 Operações de um Típico Terminal .....	63
<b>4.3 Visão geral do Estudo de Caso</b> .....	<b>67</b>
4.3.1 Estudo de Caso deste Trabalho .....	68
4.3.2 Trabalhos Relacionados ao Estudo de Caso .....	71
<b>5 PROPOSTA E IMPLEMENTAÇÕES DO SISTEMA</b> .....	<b>79</b>
<b>5.1 Sistema Embarcado FDS e FDI</b> .....	<b>80</b>
<b>5.2 O Sistema FDS para Detecção e Predição de Falhas</b> .....	<b>80</b>
5.2.1 Transformada Discreta de Wavelet .....	81
5.2.2 Energia do Sinal .....	83
5.2.3 Filtro Adaptativo LMS .....	84
<b>5.3 O Sistema FDI para Diagnóstico de Falhas</b> .....	<b>85</b>
5.3.1 Índice de Detecção de Falhas.....	85
<b>5.4 Chip para Predição e Detecção de Falhas</b> .....	<b>86</b>
5.4.1 Arquitetura do FDS.....	86
5.4.2 Arquitetura para Autoteste Funcional .....	87
5.4.3 Arquitetura do FDI.....	89
5.4.4 Arquitetura do FDS com SPI .....	90
5.4.5 Arquitetura do FDS e FDI com SPI.....	91
<b>5.5 Arquitetura para Indústria 4.0</b> .....	<b>91</b>
<b>5.6 Descrição Operacional do Chip</b> .....	<b>93</b>
5.6.1 Protocolo de Comunicação SPI para o Chip.....	95

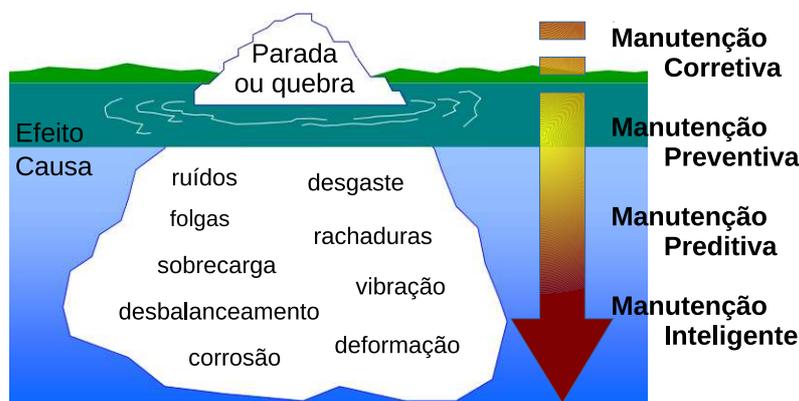
5.6.2 Ajuste dos Parâmetros do Chip.....	96
<b>6 RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>99</b>
<b>6.1 Desenvolvimento do Chip na Biblioteca Educacional de 90 nm.....</b>	<b>100</b>
6.1.1 Síntese Lógica do Chip .....	100
6.1.2 Síntese Física do Chip.....	102
6.1.3 Resultados da Síntese Física .....	106
<b>6.2 Desenvolvimento do Chip na Biblioteca Comercial de 0,6 <math>\mu m</math> .....</b>	<b>107</b>
6.2.1 Síntese Lógica do Chip .....	108
6.2.2 Síntese Física do Chip.....	109
6.2.3 Resultados da Síntese Física .....	109
<b>6.3 Desenvolvimento do sistema com Microcontrolador e FPGA .....</b>	<b>111</b>
6.3.1 Implementação dos algoritmos em FPGA .....	112
6.3.2 Testes Simulados com FPGA.....	113
<b>6.4 Experimentos com a Bancada de Teste .....</b>	<b>113</b>
6.4.1 Descrição dos Testes .....	115
6.4.2 Espectro de Frequência dos Sinais de Teste .....	117
<b>6.5 Simulações do Chip Pós-síntese Física .....</b>	<b>120</b>
6.5.1 Simulação com Falha por Pressão no Freio de 100 $kPa$ .....	122
6.5.2 Simulação com Falha por Pressão no Freio de 300 $kPa$ .....	123
6.5.3 Simulação com Falha por Engrenagem de Dente Desgastado.....	125
6.5.4 Simulação com Falha por Engrenagem de Dente Fraturado .....	126
6.5.5 Simulação com Falha por Engrenagens sem Lubrificação .....	127
6.5.6 Simulação de Autoteste Funcional.....	129
<b>6.6 Discussão dos Resultados .....</b>	<b>130</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>133</b>
<b>7.1 CONTRIBUIÇÕES TÉCNICAS .....</b>	<b>135</b>
<b>7.2 TRABALHOS SUBMETIDOS OU PUBLICADOS.....</b>	<b>136</b>
<b>7.3 TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>137</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>139</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico permitiu que tarefas repetitivas ou de alto risco na indústria, executadas por operadores humanos, fossem automatizadas. Entre os setores mais beneficiados, pode-se listar o químico, petroquímico, siderúrgico, energético e de saneamento básico. Esse fenômeno acarretou o surgimento de plantas industriais mais complexas com práticas de controle e monitoramento *online* ou de tempo real. Independente dos avanços obtidos, os equipamentos utilizados na indústria estão sujeitos à degradação na medida em que são utilizados. Contribuem para isso danos causados por operadores, corrosão, desgaste, rachaduras e outros problemas que podem agravar a degradação do sistema. Nessa situação, reparos devem ser feitos a fim de não comprometer a cadeia produtiva e manter um desempenho satisfatório do equipamento (LEE, 2003).

Em sistemas críticos como as linhas de transporte de petróleo em que sua interrupção ou mau funcionamento representam riscos para vidas humanas, danos ao meio ambiente ou custos patrimoniais, adotar estratégias de manutenção mais eficazes para aliviar as causas (Figura 1.1), a monitorização, o prognóstico e diagnóstico, aliados a sistemas de tempo real, são de suma importância.

Figura 1.1: Principais estratégias de manutenção.



Hoje se empregam principalmente dois tipos de manutenção no ramo petrolífero: a corretiva e a preventiva. A manutenção puramente corretiva consiste no conserto ou substituição de uma máquina ou equipamento após a quebra ou falha (e como a ação de manutenção ocorre em reação à falha, esta alternativa também é muitas vezes chamada de "manutenção reativa"). Neste caso, não há tempo ou recursos despendidos entre as falhas, porém o custo da manutenção torna-se mais elevado e pode haver graves consequências, como riscos aos funcionários e paradas forçadas no processo produtivo. Na manutenção preventiva assume-se certo nível de degradação para as máquinas e equipamentos,

normalmente baseado em estatísticas de falhas anteriores ocorridas com os equipamentos/processos, e realiza-se uma manutenção periódica. Com esta prática pode-se substituir ou reparar equipamentos ou peças que ainda teriam condições de operar por mais tempo, mas não se exclui paradas inesperadas por quebra. Nos dois casos os custos são altos e o tempo de parada pode ser muito longo.

Quando um equipamento desempenha as tarefas ou serviços dentro da especificação para a qual foi projetado, se diz que este está em funcionamento normal. Havendo desvio dessa condição, se determina a degradação de desempenho. Quando se atinge um estado no qual o equipamento deixa de desempenhar suas funções de modo nominal, considera-se uma falha. A manutenção preditiva ocorre em resposta às condições que não correspondem ao funcionamento normal. Quando essa situação é detectada a tempo, um diagnóstico da causa pode ser possível e decisões apropriadas para reparo são tomadas (CHOLETTE et al., 2013).

Atualmente é possível transpor os limites impostos pela manutenção clássica (corretiva, preventiva e preditiva) e avançar na direção da manutenção inteligente (seção 2.2.2), adicionando-se tolerância a falhas, devido ao desenvolvimento tecnológico dos sensores, dos sistemas computacionais embarcados e da microeletrônica. São características da manutenção inteligente a rapidez e a precisão da avaliação do equipamento. Essas qualidades possibilitam a detecção, o diagnóstico e a predição de falhas (BOSA, 2009).

No caso de uma falha ser detectada, em uma manutenção inteligente, o sistema pode automaticamente se reconfigurar de forma a continuar operando, ainda que de maneira degradada, até a ocorrência da manutenção (LEE, 1996). Esta característica de reconfiguração permite, por exemplo, limitar o torque, ou a corrente, de um motor com a intenção de reduzir o esforço sobre os componentes e assim prolongar o tempo de vida útil dos sistemas.

Considerando o interesse em detectar e identificar possíveis problemas nos processos industriais em tempo hábil, este trabalho vem a contribuir com um sistema composto por processamento digital de sinais (DSP - *Digital Signal Processing*) para a atividade de detecção e predição de falhas como uma ferramenta de auxílio à manutenção inteligente.

As técnicas de DSP em sistemas de tempo discreto vêm sendo cada vez mais empregadas com os sistemas de controle e manutenção inteligente. Será apresentado neste trabalho o desenvolvimento de um chip que utiliza algumas dessas técnicas, a saber: transformada discreta de *wavelet* (DWT - *Discrete Wavelet Transform*) (WALNUT, 2002), extração de energia e filtro adaptativo para detecção de falhas em sistemas de engrenagem.

O Filtro Adaptativo pode possuir uma estrutura de resposta impulsional finita (FIR - *Finite Impulse Response*) ou de resposta impulsional infinita (IIR - *Infinite Impulse Response*). Pelo fato da estrutura FIR ser naturalmente estável, por não possuir realimentação e o método dos mínimos quadrados médios (LMS - *Least-Mean Square*) (HAYKIN, 2001) ser de baixa complexidade, será adotado neste trabalho a arquitetura de um filtro adaptativo LMS do tipo FIR.

Como a operação do sistema em estudo ocorre *online*, todos os cálculos de processamento digital devem ocorrer durante o tempo de um período de amostragem na aquisição dos dados dos sensores, ou seja, em tempo real. Neste sentido, a escolha de algoritmos tais como DWT e Filtro Adaptativo com algoritmo LMS que apresentam baixa complexidade computacional e bom desempenho tornam-se de grande relevância (KONEZNY; RAO, 1995).

Neste trabalho, foi utilizada uma bancada de testes (HENRIQUES et al., 2010) para validar a técnica desenvolvida em situações reais de falha identificadas em campo do estudo de caso. O conjunto atuador-válvula em estudo, encontra-se instalado na bancada de teste com um sistema de freio a disco acoplado ao seu eixo. Deste modo, os esforços mecânicos exercidos pelo fluxo de fluidos no interior de uma válvula durante os movimentos de abertura ou fechamento podem ser emulados.

O sistema foi instrumentado para possibilitar o monitoramento do esforço exercido pelo atuador nas engrenagens que comandam a abertura e fechamento da válvula, bem como situações atípicas oriundas do desgaste das engrenagens. Deste modo, sensores de torque e vibração foram instalados em pontos específicos para coletar dados em condições de operação normal, de desgaste e de falha. Visando a predição em tempo real e baixo consumo de energia, os sinais obtidos da variação do comportamento dinâmico do sistema em teste foram aplicados aos algoritmos embarcados em *hardware* denominados *Fault Detection System* (FDS) (PICCOLI et al., 2013a; PICCOLI et al., 2015a) e *Fault Detection Index* (FDI) (PICCOLI et al., 2015b) e descritos em linguagem *Verilog*.

A implementação em *hardware* dos algoritmos FDS e FDI para o monitoramento de condição de um sistema possibilitou o desenvolvido em chip para área de manutenção inteligente, agregando em micro escala o baixo consumo de energia, a detecção e diagnóstico em tempo real. Desta forma, foi testada em laboratório e apresentada uma proposta inovadora que possa atender a diversos equipamentos no que tange ao processo de predição, diagnóstico e detecção de falhas.

## 1.1 Visão Geral dos Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é especificar, implementar e avaliar uma nova solução descrita em *hardware* capaz de detectar, prever e diagnosticar falhas em tempo de operação de equipamentos industriais. O caso em estudo foi testado em laboratório com uma válvula elétrica comercial utilizada na indústria petrolífera que, durante o seu funcionamento, foi submetida à injeção de falhas para emular os principais problemas operacionais que ocorrem no ambiente industrial.

Este trabalho apresenta os passos para a concepção de um circuito integrado digital aplicado à manutenção inteligente. Foi iniciado pelo fluxo de projeto, verificação e alguns testes experimentais realizados com estudo de caso de uma aplicação real.

## 1.2 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de manutenção inteligente no padrão *Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance* (OSA-CBM) (SWEARINGEN et al., 2007) de comunicação aberta para sistemas de monitoração e diagnóstico de máquinas (seção 2.2.1 manutenção baseada na condição), testado e validado em ambiente de emulação real através de uma bancada de testes. Foram utilizadas técnicas de injeção de falhas em *hardware* durante o funcionamento.

Em uma primeira versão denominada de *Fault Detection System* (FDS), o algoritmo opera com técnicas de processamento de sinais em tempo real e monitora o comportamento de uma válvula elétrica industrial até o nível de detecção das condições do padrão OSA-CBM.

Neste cenário, uma nova versão melhorada também é apresentada, adicionando o *Fault Detection Index* (FDI) (PICCOLI et al., 2015b) ao FDS (PICCOLI et al., 2013a; PICCOLI et al., 2015a). Com isso, implementa-se a técnica FDS proposta em conjunto com FDI para realizar o mesmo monitoramento anterior e classificar os tipos de falhas, revelando assim o diagnóstico e a saúde do equipamento em forma de gráficos.

As soluções propostas neste trabalho propõem que as técnicas desenvolvidas em *software* (PICCOLI et al., 2013a; PICCOLI et al., 2015a; PICCOLI et al., 2015b) sejam implementadas em *hardware*. Esta tese traz os seguintes avanços e contribuições técnicas:

Tabela 1.1: Características das técnicas propostas.

Técnica	Característica e Resumo
<b>FDS</b> em <i>hardware</i>	Apresenta o sistema FDS com processamento de sinais descrito em linguagem de <i>hardware Verilog</i> . No laboratório, foi utilizado um conversor de sinal A/D com um sistema de aquisição de dados para converter os sinais dos sensores de torque e vibração em formato digital, e depois processados com o algoritmo no computador.
<b>FDS + FDI</b> em <i>hardware</i>	Apresenta os sistemas FDS e FDI em conjunto com processamento de sinais descrito em linguagem de <i>hardware</i> . O chip é descrito em <i>Verilog</i> , tem a funcionalidade de teste e pode ser acessado via comunicação serial SPI.

### 1.3 Apresentação dos Capítulos

Este trabalho foi dividido em três partes, conforme descrito abaixo:

**Parte I – Fundamentos** página 27 (Capítulos 2 ao 4):

- Capítulo 2 (ESTADO DA ARTE EM TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE): Apresenta uma breve introdução relacionada aos principais conceitos que envolvem tolerância a falhas e manutenção inteligente;
- Capítulo 3 (REVISÃO DE TÉCNICAS E METODOLOGIAS): Apresenta algumas técnicas para a detecção de falhas, principais conceitos de sistema embarcado de tempo real e ferramentas computacionais usadas na análise e no projeto de circuitos digitais.
- Capítulo 4 (UTILIZAÇÃO DE VÁLVULAS NO MODAL DUTOVIÁRIO DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO): Aborda a importância e crescimento do modal dutoviário no Brasil e um esquema de abastecimento para um típico terminal. Apresenta um dos equipamentos mais críticos, utilizado no transporte de derivados de petróleo como estudo de caso. Por fim, é realizado um levantamento bibliográfico relativo ao estudo de caso e ao estado da arte na área de manutenção inteligente que serviram de inspiração e referência para este trabalho.

**Parte II – Metodologia** página 79 (Capítulo 5):

- Capítulo 5 (PROPOSTA E IMPLEMENTAÇÕES DO SISTEMA): Apresenta as técnicas FDS e FDI, a implementação em *hardware* proposta neste trabalho, usado para a atividade de identificar condições de falhas a partir do monitoramento na abertura e fechamento de válvula, sinais de torque e vibração, e a degradação do mecanismo acionado pelo rotor de um atuador elétrico.

**Parte III - Resultados e Conclusões** página 99 (Capítulos 6 e 7):

- Capítulo 6 (RESULTADOS OBTIDOS): Apresenta os resultados obtidos a partir de experimentos com uma bancada de testes e injeção de falhas reais via *hardware* através da inserção de peças defeituosas e uso de disco de freio em tempo de execução sobre a válvula elétrica, onde foi instalado sensores e comunicação com o sistema desenvolvido;
- Capítulo 7 (CONSIDERAÇÕES FINAIS): Apresenta as conclusões relacionadas às técnicas submetidas aos testes no capítulo anterior, as conclusões relacionadas ao desenvolvimento desta tese e finalmente sugere alguns trabalhos para serem desenvolvidos no futuro.

## PARTE I - FUNDAMENTOS

## 2 ESTADO DA ARTE EM TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE

Devido a consequências catastróficas em aplicações de equipamentos na presença de falhas (PANDYA; MALEK, 1998), e a demanda por processamento em tempo real, a questão de tolerância a falhas tem ganhado atenção da comunidade científica nos últimos anos. Atualmente, muitos equipamentos requerem resposta rápida, correta e uma maior confiabilidade, pois enquanto a complexidade e autonomia operacional aumenta, a intervenção humana pode ser reduzida.

Após a ocorrência de uma falha na atuação de uma ou mais engrenagens em um sistema mecânico, por exemplo, poderá ocorrer uma parada, uma quebra ou tornar esse sistema incontrolável. A continuidade de execução e controle desse sistema é fundamental do ponto de vista da manutenção inteligente, principalmente em equipamentos operando sob condições hostis de trabalho e instalados em locais remotos com acesso difícil ou demorado.

Inicialmente, serão abordados alguns fundamentos nos tópicos de tolerância a falhas e manutenção, e posteriormente, com mais detalhe, o estado da arte na área de manutenção inteligente: Tolerância a Falhas na seção 2.1 (página 27); Técnicas de Manutenção na seção 2.2 (página 30); Estado da Arte em Manutenção Inteligente na seção 2.3 (página 36).

### 2.1 Tolerância a Falhas

Com a inserção dos computadores nos diferentes ramos da sociedade moderna, os sistemas computacionais tornaram-se ferramentas indispensáveis, visto os inúmeros benefícios alcançados com seu uso (AVIZIENIS, 1997). Tais benefícios tornaram-se imprescindíveis, podendo ter consequências trágicas quando os sistemas computacionais deixarem de operar ou funcionarem incorretamente, a exemplo de: aeronaves, ferrovias, controle de tráfego de automóveis; sistemas de emergência; controle de tráfego aéreo; sistemas de segurança de usinas nucleares; equipamentos médico-hospitalares (CLARK; PRADHAN, 1995).

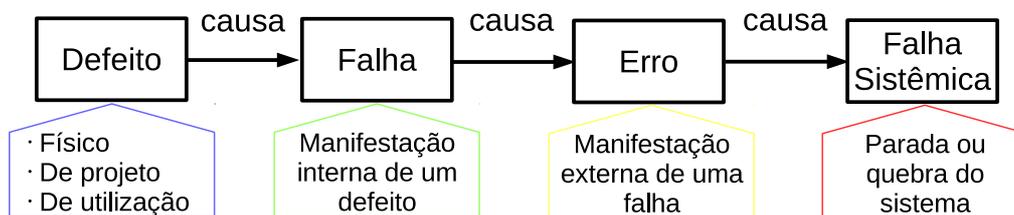
Sistemas tolerantes a falhas contém mecanismos para detecção antes que falhas ocorram. A concepção dos mecanismos de detecção exige conhecimento das classes de falhas e seus efeitos sobre o comportamento do sistema. Além disso, um estudo de causas e efeitos ajuda a caracterizar a susceptibilidade de o sistema falhar.

Uma abordagem efetiva para alcançar estas metas são os procedimentos de injeção de falhas. Porém, para obter resultados consistentes, essa por sua vez, deve prover também um modelo que represente igualmente falhas encontradas em operações reais (MIREMADI; TORIN, 1995).

### 2.1.1 Definições de Termos Empregados

As falhas são causadas por fenômenos naturais de origem interna ou externa e ações humanas acidentais ou intencionais (LAPRIE, 1995). Quando ocorrem defeitos ou faltas no sistema, sua manifestação interna dá origem às falhas, que subsequentemente, em sua manifestação externa, resultam em erros. Esses, por sua vez, podem ocasionar falhas sistêmicas devido ao desvio do comportamento especificado do sistema, por exemplo, parada ou quebra. Portanto, existe uma relação de causa-efeito relacionada a estes eventos conforme explicitado na Figura 2.1.1.

Figura 2.1: Relação entre defeito, falha, erro e falha sistêmica.



Fonte: adaptado de (BALEN; LUBASZEWSKI, 2014).

Na literatura que trata da manutenção, encontram-se diversas definições e conceitos apresentados para determinados termos (ABNT, 1994; LAPRIE, 1995). Na ausência de uma palavra diferente de "falha" para traduzir *failure* optou-se por adotar "falha sistêmica" neste texto:

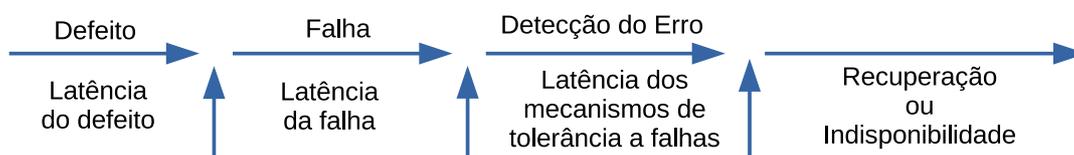
- Degradação é o processo por envelhecimento e desgaste de peças que aumenta a probabilidade de ocorrência de falhas e diminui a confiabilidade e desempenho;
- A falha é a manifestação interna no sistema de um defeito em função da degradação do mesmo, mas não necessariamente pode levar a um erro;
- O erro é o mau estado de funcionamento de um sistema que compromete seu desempenho esperado;
- A falha sistêmica marca o término da capacidade do dispositivo ou sistema de desempenhar sua função, levando invariavelmente à indisponibilidade;

- A causa de um erro é uma falha e pode levar a uma falha sistêmica pela manifestação de um ou mais erros no serviço entregue;
- O serviço entregue por um sistema é o comportamento conforme é percebido por outro sistema, interagindo com o sistema considerado: seu(s) usuário(s).

A Figura 2.2 mostra alguns conceitos relacionados à terminologia de tolerância a falhas. Quando uma falha causa uma alteração incorreta no estado da máquina, um erro ocorre. O tempo entre a ocorrência da falha e a primeira percepção de um erro é chamado latência da falha. Embora uma falha permaneça localizada no código ou circuito afetado, múltiplos erros podem se originar da mesma e se propagar através do sistema. Se os dispositivos de detecção necessários estão presentes, a propagação do erro será constatada após um período de tempo denominado latência dos mecanismos de tolerância a falhas.

Quando os mecanismos de tolerância a falhas detectam um erro, diversas ações podem ser iniciadas para a manipulação da mesma, visando conter os erros. A recuperação ocorre se essas ações têm sucesso, caso contrário, o sistema encontra-se com defeito (CLARK; PRADHAN, 1995).

Figura 2.2: Falha e consequências.



Fonte: modificado de (CLARK; PRADHAN, 1995).

### 2.1.2 Arquitetura de um Ambiente de Injeção de Falhas

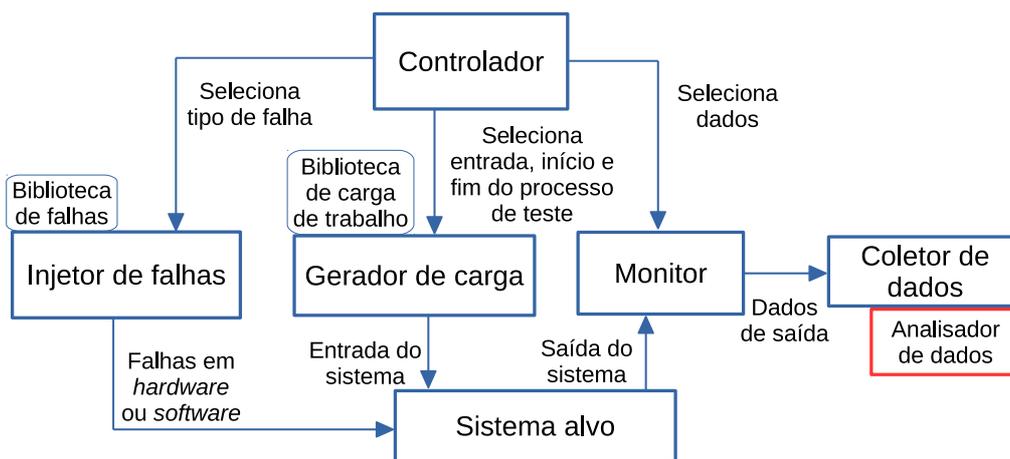
O uso de técnicas de tolerância a falhas em sistemas com característica de tempo real exige que as mesmas sejam validadas. Na validação por injeção de falhas são testados os mecanismos tolerantes, possibilitando a observação do comportamento do sistema frente aos estímulos provocados pelas falhas injetadas (CHILLAREGE; BOWEN, 1989).

Uma arquitetura genérica para um ambiente de injeção de falhas é demonstrado na Figura 2.3 (HSUEH; TSAI; IYER, 1997). Um ambiente de injeção de falhas consiste basicamente em:

- **Controlador:** responsável por coordenar todo o ambiente, normalmente é um computador que gerencia o processo de testes;

- **Gerador de carga:** responsável pelo fornecimento de comandos, os quais devem ser executados pelo sistema alvo, no caso de *software* utiliza-se uma biblioteca de carga de trabalho;
- **Monitor:** observa o sistema em teste, executa instruções quando necessário e faz a interface entre o controlador e o sistema sob teste, disparando a coleta de dados sempre que necessário;
- **Injetor de falhas:** utilizado via *software* ou *hardware* para injeção das falhas, emulando a presença de falhas no sistema alvo;
- **Sistema alvo:** sistema sob teste onde as falhas serão injetadas e monitoradas;
- **Coletor de dados:** recolhe os dados do sistema;
- **Analizador de dados:** responsável por processar e analisar os dados coletados, podendo trabalhar *offline*, *online* ou em tempo real.

Figura 2.3: Arquitetura de um ambiente de injeção de falhas.



Fonte: (HSUEH; TSAI; IYER, 1997)

O injetor de falhas, que pode ser implementado por *hardware* ou por *software*, pode suportar diferentes tipos, localizações e tempos de falhas.

## 2.2 Técnicas de Manutenção

Com o advento da Revolução Industrial, que permitiu uma transição para novos processos de manufatura e a fabricação de produtos em larga escala, surgiram necessidades de melhoria e mudanças positivas do paradigma da manutenção (AFFONSO, 2006).

A Tabela 2.1 apresenta os métodos clássicos de manutenção, dentre os quais a es-

tratégia preditiva é mais eficiente, pois pode indicar as condições reais de funcionamento das máquinas com base no monitoramento do equipamento, e assim prever o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições para que esse tempo de vida seja bem aproveitado.

Tabela 2.1: Principais características das estratégias clássicas de manutenção.

Características	Estratégias		
	Manutenção Corretiva	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva
Estado de operação da máquina/equipamento	Fora de serviço	Fora de serviço	Operando ou fora de serviço
Razão da interferência	Falha	Inspeção programada	Controle programado ou contínuo
Tarefas a serem executadas na máquina/equipamento	Reposição de peças/componentes	Desligamento para inspeção/reposição	Monitoramento
Objetivo da intervenção	Retorno ao trabalho	Manutenção do funcionamento	Predição ou detecção

Fonte: (MARÇAL; SUSIN, 2005).

A engenharia de controle, focada em métodos clássicos de manutenção e no desenvolvimento de critérios de desempenho tais como a estabilidade e precisão, por sua vez, necessita de algoritmos de detecção de falhas e isolamento mais precisos e eficientes (LO; WONG; RAD, 2006). Existe uma variação da manutenção preditiva conhecida como manutenção baseada na condição (CBM - *Condition Based Maintenance*) (Qiu et al., 2006), em que as ações de reparos pela equipe de manutenção são tomadas com base nas condições monitoradas na planta industrial.

A manutenção poderá torna-se proativa, por meio de sensores inteligentes ou ferramentas analíticas de dados desenvolvidos para esse fim. Então, com o objetivo de continuar operando de maneira inteligente, o sistema poderá ser reconfigurado automaticamente quando uma falha é detectada e o defeito corrigido antes que se propague para a saída do sistema.

### 2.2.1 Manutenção Baseada na Condição

A manutenção baseada na condição (CBM - *Condition Based Maintenance*) é utilizada para monitorar a condição do equipamento, para reduzir a incerteza das atividades

de manutenção. Compreende o acompanhamento dos indicadores de funcionalidade do equipamento em tempo de execução *online* (de tempo real) ou *offline*, obtendo assim um indicativo de potenciais problemas e falhas incipientes que fariam com que o equipamento ou componente se desviassem de um nível de desempenho aceitável.

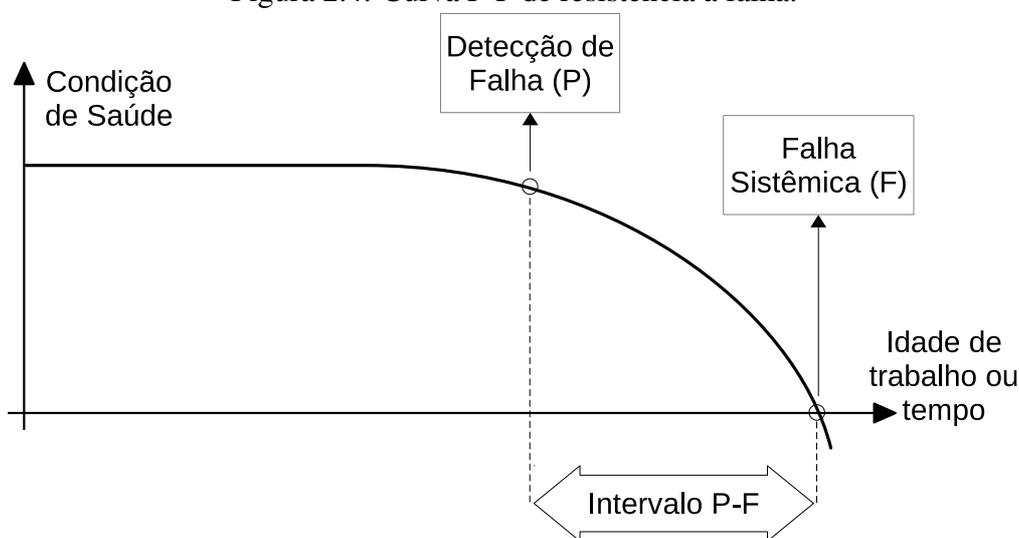
A arquitetura aberta *Open System Architecture for Condition-Based Maintenance* (OSA-CBM) (SWEARINGEN et al., 2007) para uma interoperabilidade dos componentes do CBM é descrita em termos de camadas funcionais: desde detecção e aquisição de dados até suporte de decisão. Uma descrição detalhada das entradas, saídas e funções gerais das camadas são especificadas abaixo:

1. **Aquisição de dados:** O módulo de aquisição de dados fornece o sistema CBM com dados do sensor ou transdutor digitalizados;
2. **Manipulação de dados:** Este módulo recebe e processa sinais e dados oriundos do módulo **aquisição de dados** e de outros módulos de **manipulação de dados**;
3. **Monitoramento das condições:** O monitor de condição recebe dados de módulos anteriores e de outros também monitorados. Seu foco principal é de extrair e comparar características com os valores esperados ou limites operacionais e indicadores de condição de saída (por exemplo, nível baixo, nível normal e nível alto). Também deve ser capaz de gerar alertas baseadas em limites operacionais predefinidos;
4. **Avaliação da saúde:** Recebe dados de diferentes monitores de condição ou de outros módulos de **avaliação da saúde**. O foco principal de seu trabalho é o de prescrever se a saúde no componente, no equipamento ou no sistema monitorado, tem se degradado. Deve ser capaz de gerar registros de diagnóstico e prever possibilidades de falha. O diagnóstico deve ser baseado em tendências apresentadas no histórico de saúde, estado operacional, carga e no histórico de manutenção;
5. **Prognóstico:** a principal função desta camada é projetar o estado de saúde futuro do equipamento ou estimar sua vida útil remanescente e deve ter a possibilidade de tomar conta de dados de todas as camadas anteriores;
6. **Apoio à tomada de decisão:** Recebe dados do módulo de avaliação de saúde e módulo de prognóstico. Seu foco principal é fornecer recomendações relacionadas às estratégias de manutenção e modificação da configuração ou perfis do ativo. O módulo precisa levar em consideração o histórico de operações, perfis atuais e futuros, gerar ações recomendadas de como executar o ativo até que a missão atual seja concluída sem ocorrência de avaria;

7. **Interface humana (apresentação):** O módulo de apresentação deve disponibilizar dados de todos os módulos anteriores. Normalmente o *status* das camadas mais importantes (avaliações de saúde, avaliações prognósticas ou recomendações de apoio à decisão) e alertas serão exibidos nesta camada, com a capacidade de detalhar as camadas dependendo das necessidades de informação do usuário.

A manutenção CBM baseia-se no fato de que a maioria das falhas não ocorrem instantaneamente e que muitas vezes é possível detectá-la durante os estágios de deterioração do equipamento. A deterioração do equipamento pode ser vista em uma curva com dois importantes pontos "P" e "F", de Potencial ou Detecção de Falha (*Potential for Failure*) e Falha Sistêmica (*Failure*). A Figura 2.4 mostra essa curva, após o ponto P, a falha iminente pode ser detectada e no ponto F, o equipamento falha. O tempo decorrido entre "F" e "P" define a viabilidade da estratégia de manutenção CBM, caso não haja tempo para tomar medidas e evitar as consequências, a manutenção não pode ser realizada eficientemente e a técnica CBM torna-se inviável.

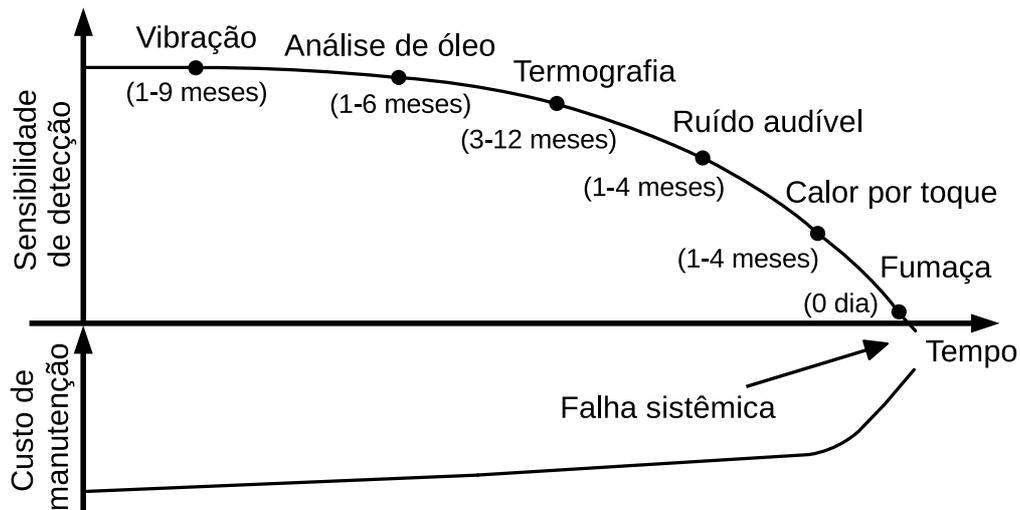
Figura 2.4: Curva P-F de resistência à falha.



Fonte: Adaptado de (FONTAINE et al., 2013).

A demanda por confiabilidade, aumenta a necessidade da integração de técnicas de sensoriamento para monitoramento das condições de máquinas rotativas (DUAN et al., 2016). A sensibilidade de sensoriamento para o diagnóstico de falhas, tais como sinais de vibração, análise de óleo e imagem infravermelha são resumidos na curva da Figura 2.5. Quanto mais incipiente a descoberta da falha e sua origem, naturalmente menores são os gastos associados a manutenção.

Figura 2.5: Diferentes técnicas de detecção e o seu correspondente custo de manutenção.



Fonte: Traduzido de (DUAN et al., 2016).

A manutenção inteligente leva para os limites mais à esquerda da curva P-F, resultando em uma qualidade melhor do produto, mais disponibilidade dos ativos e aumento dos lucros operacionais.

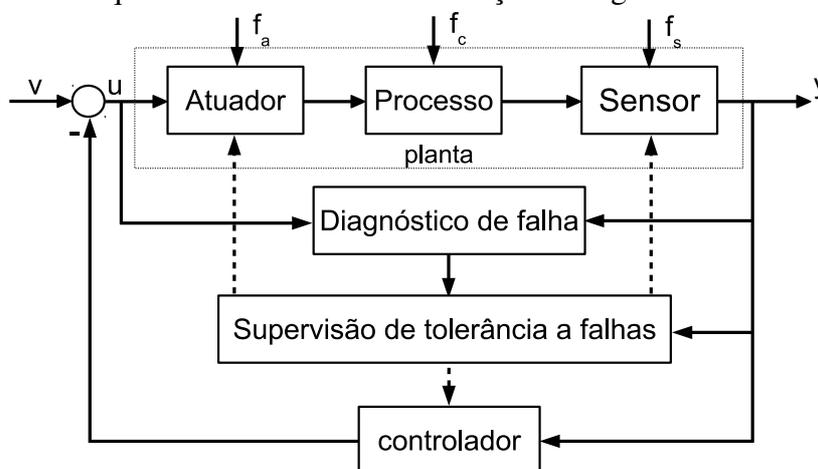
### 2.2.2 Manutenção Inteligente

A manutenção inteligente, ou proativa, possibilita o monitoramento contínuo e sistemático do estado operacional de equipamentos, revelando o comportamento temporal por meio de indicadores da degradação de variáveis de interesse. Essas podem prever riscos de um comportamento inaceitável ao longo do tempo, bem como identificar exatamente quais componentes de uma máquina tendem a falhar. São utilizadas ferramentas de predição e avaliação de desempenho de um determinado equipamento, que em última instância, permitem a manutenção proativa para evitar as avarias, sua quebra e eventual interrupção do processo (LEE, 2003).

Geralmente é aplicada em equipamentos mais complexos e críticos dentro de um processo industrial, que exigem maior demanda de confiabilidade do sistema, segurança e menor custo de operação. São utilizadas tecnologias tais como: sensores inteligentes (*smart sensors*), capazes de transmitir informações do equipamento; sensores *online* reprogramáveis, projetados para serem reconfigurados; processamento digital de sinais; algoritmos genéticos, inteligência artificial, lógica fuzzy e rede neural, utilizados para analisar tendências e indicar decisões sobre a probabilidade de falha de equipamentos monitorados na planta.

A Figura 2.6 mostra o esquema do sistema de manutenção inteligente tolerante a falhas (GAO; CECATI; DING, 2015), em que a supervisão está integrada com o diagnóstico de falhas. O diagnóstico de falhas em tempo real pode indicar se o sistema está com falha, localizá-la e avaliar o nível de degradação do funcionamento do equipamento. Com base nas informações obtidas, o sistema de supervisão pode, portanto, tomar ações apropriadas no que tange à tolerância a falhas, como modificar parâmetros para compensar o esforço de um atuador, ajustar ou reconfigurar o controlador ou até mesmo indicar reparo para substituir componentes defeituosos, de modo que os efeitos adversos de paradas sejam amenizados.

Figura 2.6: Esquema do sistema de manutenção inteligente tolerante a falhas.



Fonte: Traduzido de (GAO; CECATI; DING, 2015).

A entrada ( $u$ ) e saída ( $y$ ) do sistema da Figura 2.6, alimentam o algoritmo de diagnóstico de falha submetido à falha do atuador ( $f_a$ ), componente ( $f_c$ ) e sensor ( $f_s$ ). A consistência das informações do processo é verificada em tempo real de acordo com as características do sistema e, um diagnóstico da saúde é extraído para tomada de decisão.

Através das técnicas apresentadas neste trabalho, serão explorados ferramentas e métodos de prototipação que possibilitarão no futuro, além das tarefas de prever e detectar falhas, a possibilidade de uma implementação de um sistema de sensor inteligente ou então sensores inteligentes <sup>1</sup>, com resposta em tempo real, baixo consumo de energia e que possa ser aplicado em equipamentos automatizados com controle de *feedback* de forma a diminuir os efeitos da degradação na presença de falhas em equipamentos.

<sup>1</sup>O sensor inteligente funciona não apenas como um dispositivo de captura de sinal, mas também como uma máquina de classificação e análise. Uma abordagem com sistema de sensor inteligente (em inglês *Smart Sensor System*), consiste em elementos integrados de detecção, dispositivos de captura de sinais, algoritmos de processamento de sinais e procedimentos de interpretação e tomada de decisão. Na ausência de um operador, o sistema deve processar sinais e indicar o estado do processo e suas alterações, interpretar a informação detectada e decidir a ação de controle mais apropriada (WANG; GAO, 2006).

### 2.3 Estado da Arte em Manutenção Inteligente

As atividades de manutenção inteligente são usadas para planejar ações de manutenção com base em condições das máquinas, resolvendo os problemas antecipadamente. Assim, além de evitar falhas, controlam também a precisão das máquinas. Ao aumentar o conhecimento nessa área, as empresas podem economizar dinheiro com menos paradas, redução no custo de estoques, redução nos tempos de reparo e aumento da robustez do processo de fabricação, levando a um desempenho mais previsível (RASTEGARI; ARCHENTI; MOBIN, 2017).

O principal objetivo da pesquisa baseada em condições CBM é o de desenvolver sistemas autoajustados e integrados capazes de monitorar várias condições de trabalho e prever falhas com supervisão mínima do operador. Nesse sentido, nos últimos anos, consolidou-se a produção científica voltada ao diagnóstico de falhas em diversas aplicações.

A detecção limita-se a encontrar a falha via medições em tempo real. Já o diagnóstico, além disso, visa descobrir o tipo de falha e sua respectiva causa em fase de operação da máquina (*online*) ou em manutenção (*offline*). Muitos são os transdutores que podem ser usados para auxiliar na detecção de falhas, incluindo os sensores por emissão acústica, torque, som, vibração, temperatura, corrente, entre outros. Os métodos de monitoramento visam verificar a magnitude do sinal, o valor da raiz quadrada da média ou a magnitude do espectro de potência e são inspecionados, tipicamente, através de um limite (WANG; GAO, 2006). Os métodos mais comuns de monitoramento baseados na condição, utilizam uma gama grande de técnicas de detecção através da análise de sinais de medidas de sensores de vibração e acústica, por exemplo.

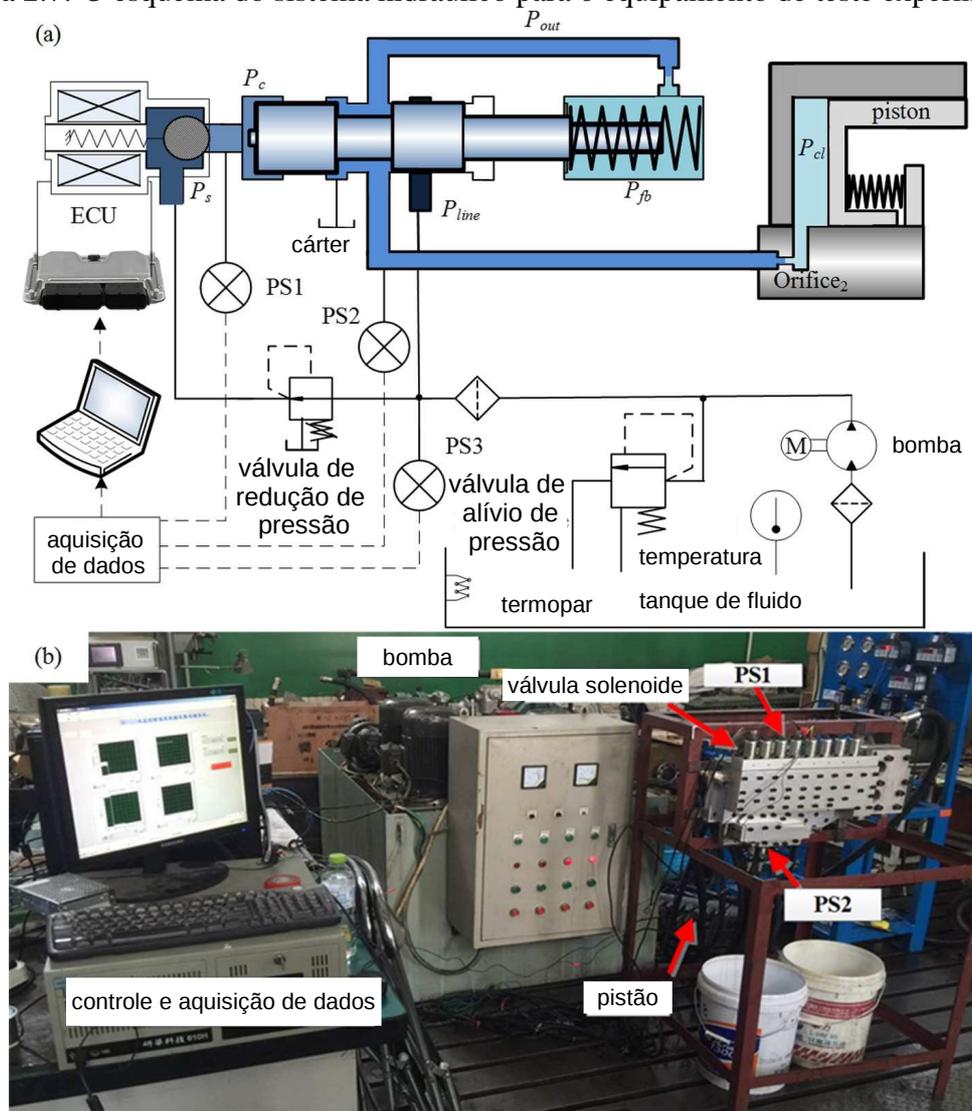
Um exemplo de aplicação em sistemas de transmissão veicular pelo monitoramento de dados obtidos por sensor de pressão, pode ser obtido em Jian et al. (2018). A transmissão automática tornou-se amplamente utilizada na fabricação de caminhões onde o sistema de embreagem-atuador eletro-hidráulico é muito utilizado devido à excelente demanda de fluxo e capacidade de controle de pressão. No entanto, a vibração induzida pelas características internas não-lineares do movimento da bobina acoplada à válvula com fluidos dinâmicos do sistema hidráulico acarreta em parâmetros inadequados, o que provoca instabilidade e conseqüentemente a deterioração do desempenho e inesperados danos ao *hardware*. Jian et al. (2018) apresentou um método de projeto ideal para a válvula de controle de pressão que garante um desempenho estável e resposta rápida do

acionamento da embreagem do sistema.

Outras pesquisas analisaram o tempo de resposta dinâmico e a força de abertura das válvulas hidráulicas, mas Jian et al. (2018) analisou os efeitos da pressão sobre a estabilidade e a resposta dinâmica do sistema através da análise de bifurcação baseada no modelo matemático não linear do sistema hidráulico e realizou uma comparação entre os resultados da resposta de pressão experimental e simulação do modelo no domínio tempo e frequência.

O esquema do sistema hidráulico para o equipamento de teste experimental é mostrado na Figura 2.7(a). A Figura 2.7(b) mostra a imagem do equipamento de teste experimental.

Figura 2.7: O esquema do sistema hidráulico para o equipamento de teste experimental.



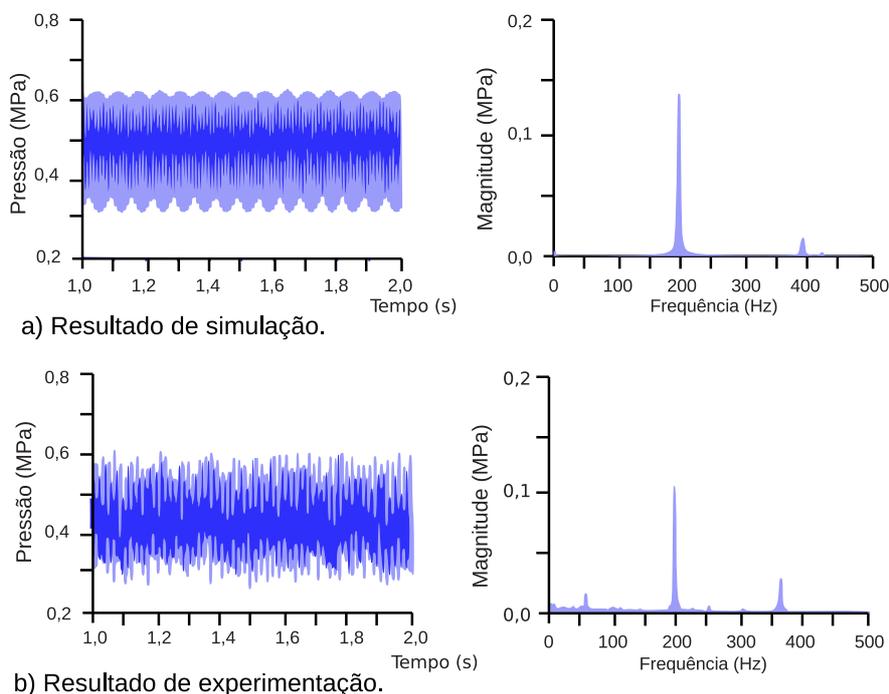
a) Esquemático do equipamento de teste (ET). b) Experimento com ET.

O sistema hidráulico é composto por três elementos: uma válvula solenoide, uma válvula de controle de pressão operada por piloto e um pistão de embreagem. A válvula solenoide atua como um estágio da válvula piloto com uma pressão de alimentação  $P_S$ . A força eletromagnética gerada pela corrente de controle aciona a válvula solenoide para abrir e gerar a pressão de operação piloto  $P_C$  na câmara da válvula de controle de pressão. A bobina da válvula de controle de pressão desliza horizontalmente na válvula para ajustar a taxa de fluxo dentro e fora da câmara de pistão até que o sistema atinja um novo ponto de equilíbrio. As portas da válvula estão conectadas com a câmara do pistão da embreagem e o cárter com a mangueiras 1 e 2.

Uma bomba de engrenagem é acionada por um motor elétrico para fornecer um fluxo constante de  $160 L/min$ . Uma válvula de alívio de pressão é usada para ajustar a pressão da linha do sistema e é conectada à válvula hidráulica de teste pela mangueira de borracha. Os sensores de pressão  $PS1$ ,  $PS2$  e  $PS3$  são usados para medir a pressão da linha, a pressão operacional do piloto e a saída da válvula de controle de pressão. Para o experimento, os parâmetros como pressão da linha, temperatura do fluido e parâmetros da válvula foram definidos como idênticos aos parâmetros da simulação.

O experimento da válvula otimizada sem restrição de estabilidade com pressão operacional de  $0,3 MPa$  foi realizado para verificar a característica de oscilação da simulação. Os dados de saída no domínio do tempo e os espectros de frequência da transformada rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) correspondentes são mostrados na Figura 2.8. A frequência de oscilação do resultado experimental é consistente com o resultado da simulação. No entanto, a magnitude da oscilação da pressão no resultado da simulação é um pouco menor do que no resultado experimental.

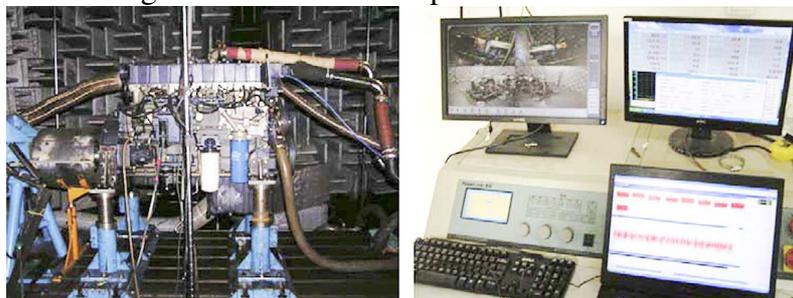
Figura 2.8: Histórico no domínio do tempo e espectro FFT sem restrição de estabilidade sob pressão piloto de 0,3 MPa.



Fonte: traduzido de (JIAN et al., 2018).

Wang et al. (2013) apresentam um método baseado em transformada *wavelet* adaptativa (AWT - *Adaptive Wavelet Transform*), um conjunto de decomposição do modo empírico (EEMD - *Ensemble Empirical Mode Decomposition*) e dimensão de correlação (CD - *Correlation Dimension*), para detectar falhas, mesmo com valores de sinal de vibração não-estacionário, em motor diesel da Figura 2.9.

Figura 2.9: O sistema experimental do motor.

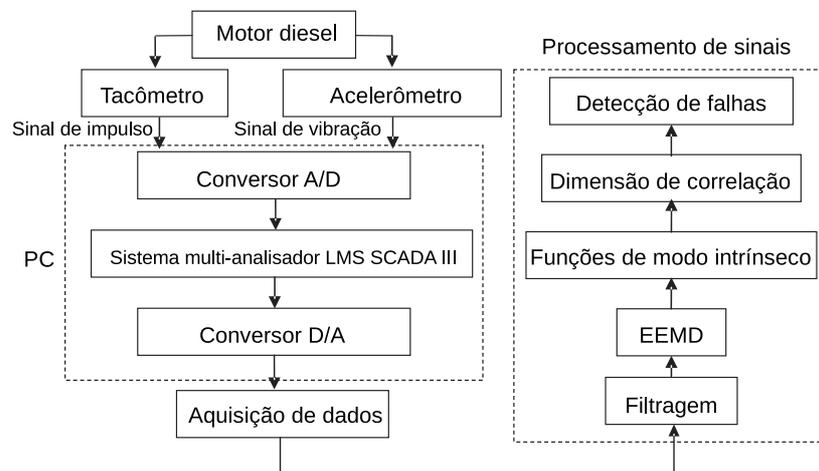


Fonte: (WANG et al., 2013).

A ideia básica da metodologia com processamento de sinais na Figura 2.10 é o de filtrar o ruído com AWT, o EEMD para extração de características e a identificação de falhas com CD. Os testes foram realizados com um motor a diesel de seis cilindros

operando a 2300 *rpm* e a 100% de carga, um dinamômetro, um sistema multi-analisador LMS SCADA III (amostragem de dados do acelerômetro de 20 *kHz*) e um computador.

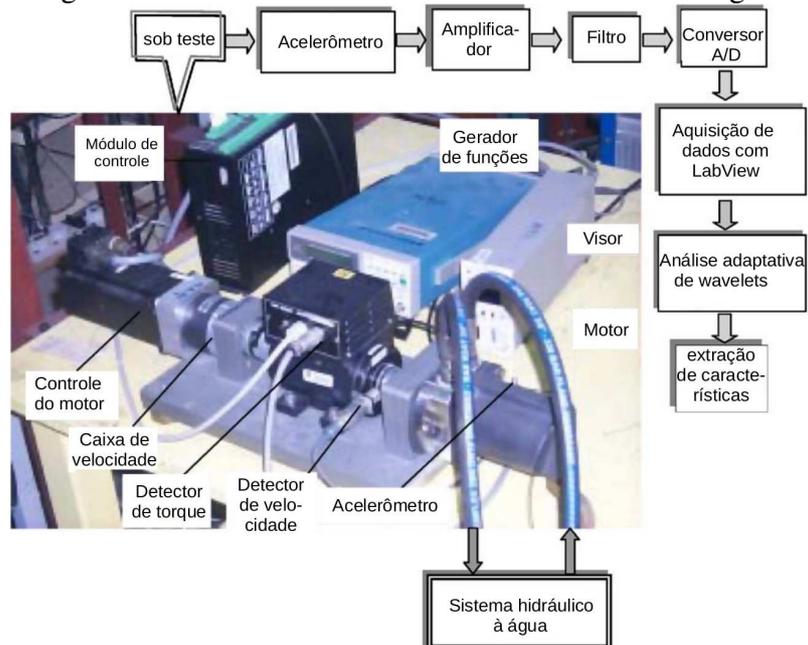
Figura 2.10: Representação gráfica do fluxo de sinal do sistema de detecção de falhas do motor.



Fonte: traduzido de (WANG et al., 2013).

Um método para modelar o sinal de vibração com base na transformada AWT foi proposto por Chen, Chua e Lim (2006). Foi desenvolvida a otimização paramétrica da AWT por um algoritmo genético (GA - *Genetic Algorithm*). Desta maneira, conforme a Figura 2.11, dados de simulação foram utilizados para extrair características relevantes para o diagnóstico de falha de um motor hidráulico à água.

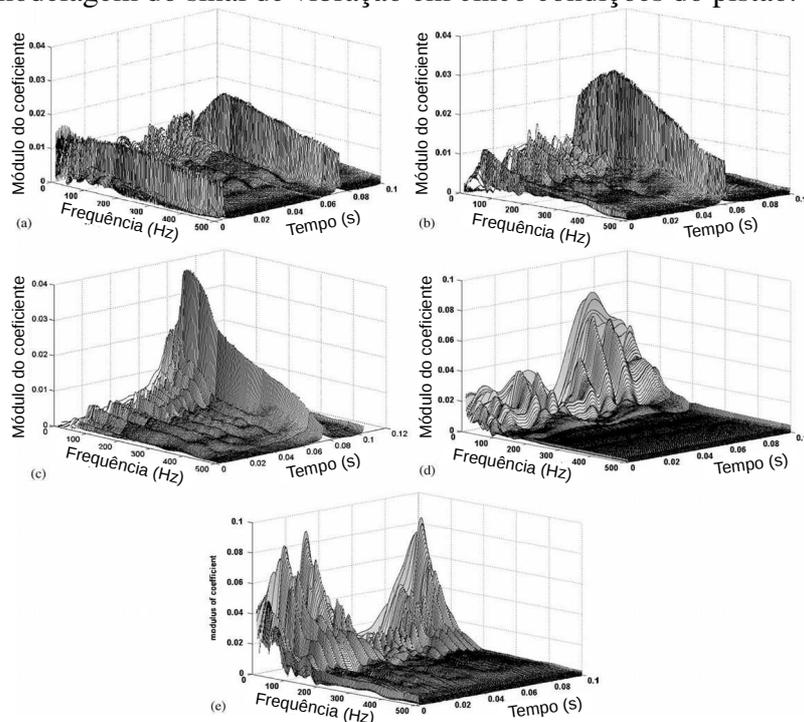
Figura 2.11: Sistema de teste de motor hidráulico de água.



Fonte: traduzido de (CHEN; CHUA; LIM, 2006).

A Figura 2.12 mostra os gráficos planares no domínio tempo-frequência dos sinais simulados obtidos pela modelagem do sinal de vibração real em cinco condições do pistão: (a) em condição normal; (b) e (c) com rachaduras curtas de 5 mm na parte inferior e na parte superior do pistão; (d) e (e) com rachaduras longas de 10 mm na parte inferior e na parte superior do pistão. Pode-se observar nos cinco sinais no plano tempo-frequência gerados pelos cinco pistões do motor hidráulico, a mudança da forma de onda e amplitude do impulso. Na Figura 2.12, as amplitudes de impulso da transformada contínua de *wavelet* (CWT - *Continuous Wavelet Transform*) dos sinais aumentam de (a) para (e), sendo os valores do módulo de coeficiente da CWT dos sinais de vibração em condições normais os menores dentre as cinco condições do pistão.

Figura 2.12: Gráficos no domínio tempo-frequência da CWT de Morlet do sinal simulado obtido pela modelagem do sinal de vibração em cinco condições do pistão.



(a) Condição normal do pistão; (b) Rachadura superior curta; (c) Rachadura superior longa; (d) Rachadura inferior curta; (e) Rachadura inferior longa.

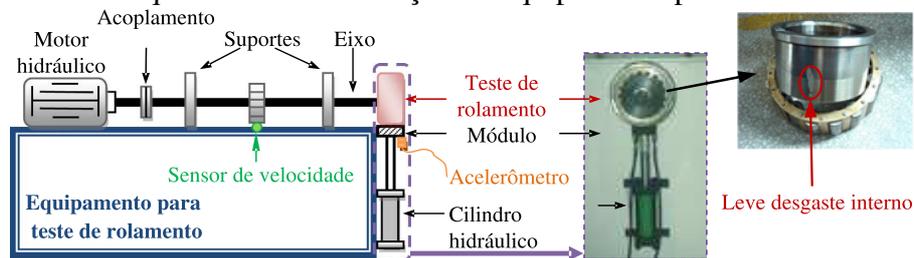
Fonte: traduzido de (CHEN; CHUA; LIM, 2006).

Como a água não é tóxica, ambientalmente amigável à prova de fogo, e ainda de baixo custo, prontamente disponível e livremente descartável, ao contrário do óleo, levou muitas indústrias a adotarem sistemas hidráulicos à água para substituir seus antigos sistemas hidráulicos a óleo. O sistema hidráulico à água em questão permite o motor de pistão axial operar na faixa de 300 a 3000 *rpm*, a velocidade de rotação de cada bomba

hidráulica à água (no total são 5) é de 1450 *rpm*. Então a técnica baseia-se nas suas frequências fundamentais, que consistem em 55 *Hz* do motor hidráulico e 120 *Hz* da bomba hidráulica. Porém, é um resultado parcial, visto que, na atualidade, uma bomba convencional de pistão com motor giratório produz torque e momentos desequilibrados no eixo e no corpo do cilindro, o que causam grandes vibrações mecânicas e ruídos que não foram considerados na simulação.

Atualmente, na indústria as máquinas rotativas são amplamente utilizadas, porém devido a severas condições de trabalho que são submetidas, tais como torque, força de impacto e alta velocidade de operação, seus componentes sofrem inevitavelmente desgastes e apresentam diversas falhas. Yuan et al. (2017) propõe o uso personalizado de múltiplas *wavelets* (PLONKA; STRELA, 1998) adaptável para monitoramento da degradação da saúde e detecção de falhas fracas (baixa relação sinal/ruído), especialmente a identificação quantitativa de assinatura de falha fraca. A Figura 2.13 mostra o experimento realizado com rolamento de locomotiva e caixa de redução para demonstrar a eficácia e viabilidade do método proposto.

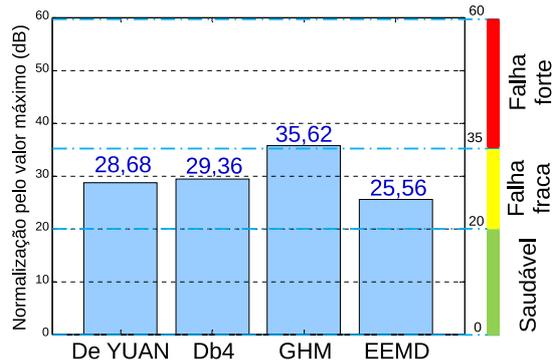
Figura 2.13: Esquemático da instalação do equipamento para teste de rolamento.



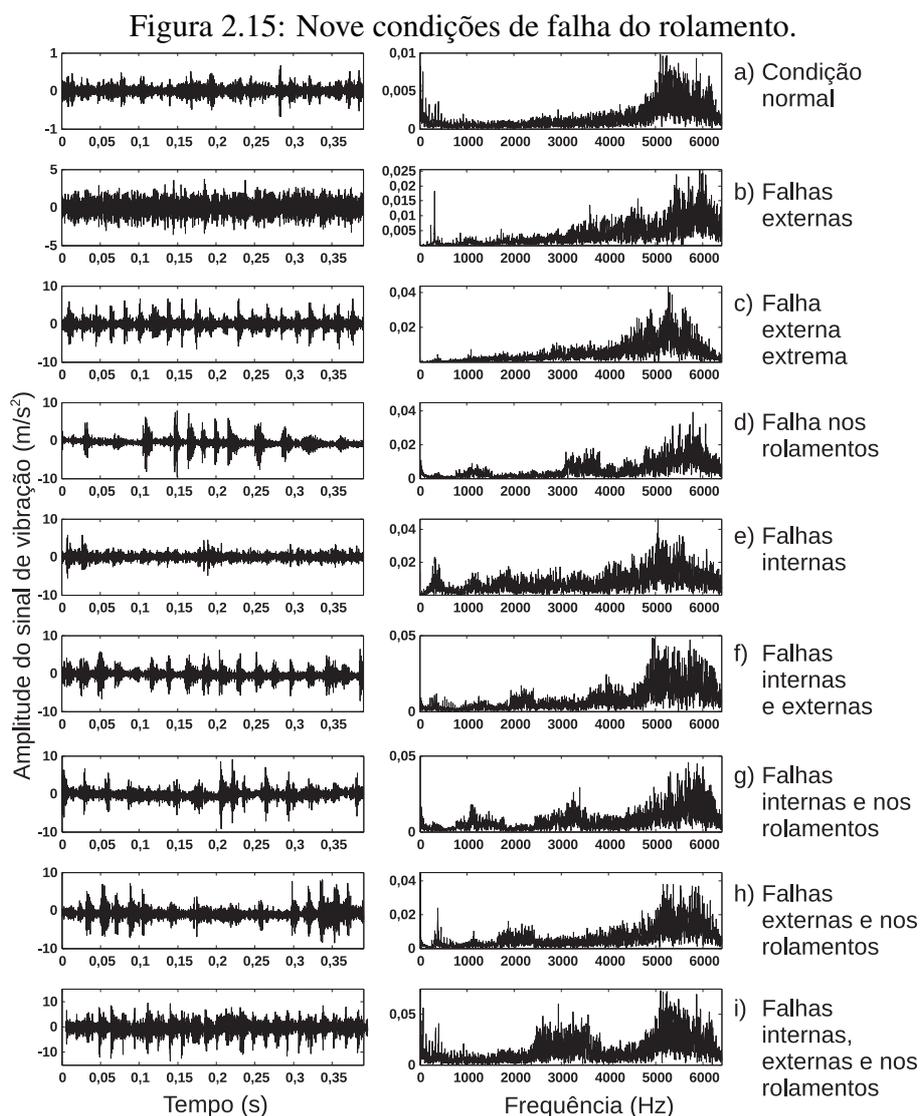
Fonte: traduzido de (YUAN et al., 2017).

O gráfico da Figura 2.14 (YUAN et al., 2017) demonstra a capacidade do método para detectar falha fraca no rolamento em comparação com outros métodos, a saber, Daubechies *wavelets* (Db4), Geronmo-Hardin-Massopust (GHM) *wavelets* e EEMD.

Figura 2.14: Valor máximo normalizado com diferentes métodos de teste em rolamentos.



Shao et al. (2017) explora o método de aprendizagem profunda associada a um tipo de rede neural (*autoencoder*) aplicado para o diagnóstico de falhas em caixa de câmbio e rolamentos de locomotivas elétricas. Conforme o autor, a complexidade computacional é a principal deficiência do método de aprendizado profundo, no entanto, a maioria dos testes pode ser concluída em menos de 40 s. São apresentados na Figura 2.15 os sinais de vibração (à esquerda) e seus respectivos espectros de frequência (à direita) de nove condições de trabalho do rolamento para um motor de 500 rpm.

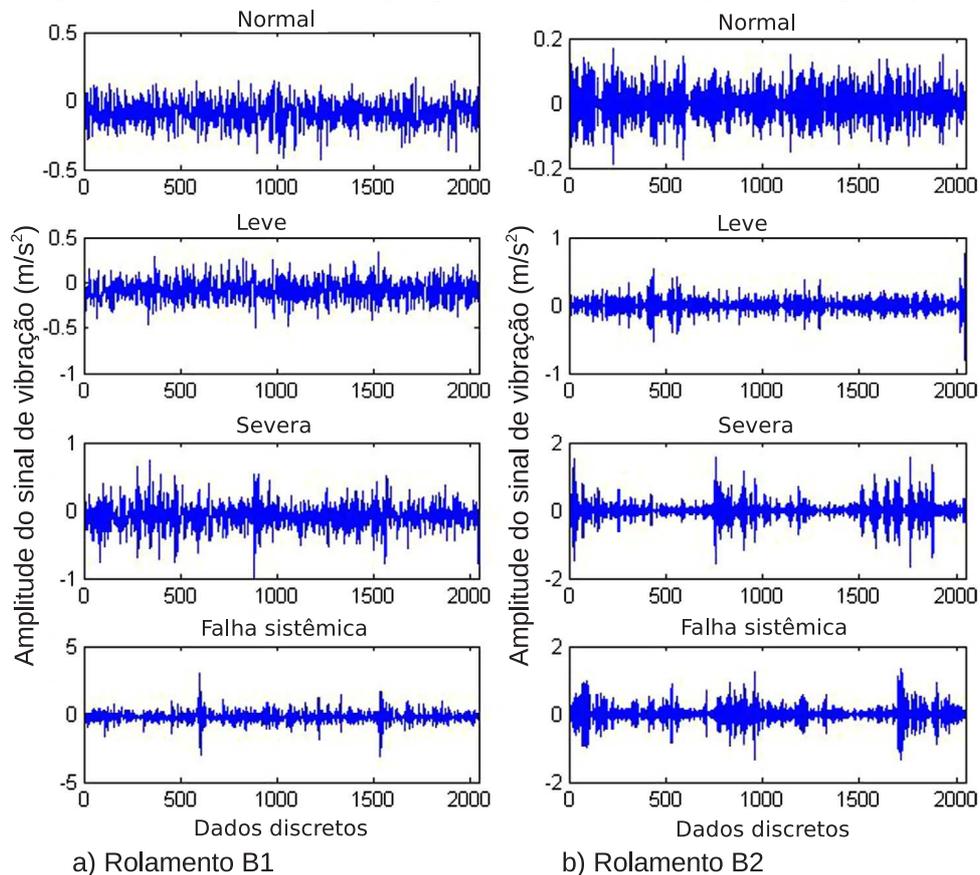


Fonte: traduzido de (SHAO et al., 2017).

O monitoramento em condição dos elementos rolantes em máquinas rotativas tem sido objeto de extensa pesquisa devido ao seu papel crucial na sua operação ininterrupta. Rai e Upadhyay (2017) apresentam um método aplicado a sinais de vibração coletados em testes de rolamentos para avaliação da degradação do desempenho com base em de-

composição de modo empírico (EMD - *Empirical Mode Decomposition*) e agrupamento de k-medoids, que por sua vez, é uma técnica de particionamento de grupos dividindo dados compostos de  $n$  objetos em grupos definidos de  $k$ . Em *offline* as amostras de sinal adquiridas são submetidas a técnica EMD. Os vetores de características extraídas ao longo da vida útil de um rolamento degradado são usados para treinar o modelo k-medoids. Finalmente, é realizado o teste *online*, uma curva de valor de confiança é gerada entre 0 e 1, onde valores próximos de 1 indicam que o rolamento está em condições normais e um valor próximo a 0 indica falha no rolamento. Conforme os gráficos gerados na Figura 2.16, com a técnica EMD já na etapa inicial desse trabalho, a degradação pode ser interpretada por um especialista humano sem necessitar de todo o processamento com o agrupamento de k-medoids.

Figura 2.16: Sinais de vibração para diferentes condições de degradação.



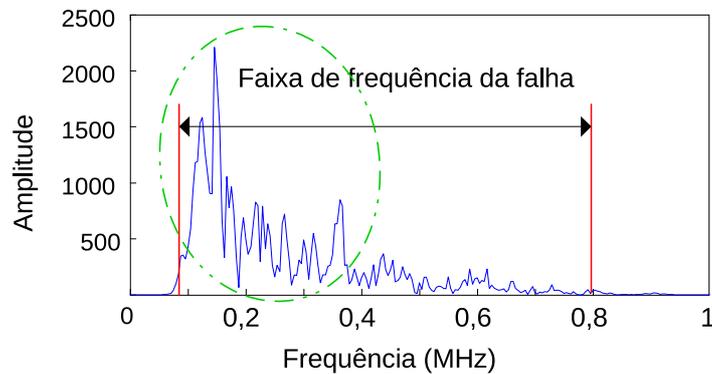
Fonte: (RAI; UPADHYAY, 2017).

Rai e Upadhyay (2017) também realizaram uma revisão bibliográfica que demonstra que os sinais de vibração são amplamente utilizados no monitoramento de condição. No entanto, é muito difícil determinar as características de falha em rolamentos necessitando construção de representação das características no espaço funcional que pode limi-



Em uma simulação de falha crescente do monopolo (quebra de lápis), foram adquiridos sinais de emissão acústica na superfície de contato da roda no trilho. O espectro de frequência desses sinais são mostrados na Figura 2.3, onde pode-se observar a disposição dos principais componentes de frequência na faixa entre 100 kHz e 400 kHz.

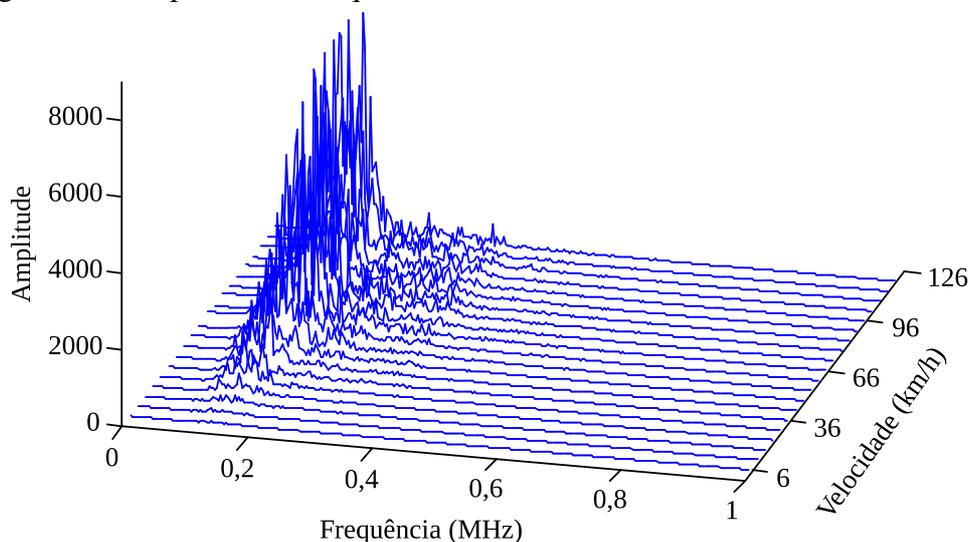
Figura 2.18: Espectro de frequência de sinais de falha simulados no transporte ferroviário.



Fonte: traduzido de (ZHANG et al., 2018).

A Figura 2.3 mostra sinais de ruído com diferentes amplitudes e espectros de frequência para velocidades entre  $6 \text{ km/h}$  e  $120 \text{ km/h}$  do trem, com um incremento de  $6 \text{ km/h}$  para cada teste. Pode-se notar que os componentes de alta e baixa frequência dos sinais de ruído têm sobreposições com os sinais de falha (Figura 2.3), principalmente em alta velocidade do trem (acima de  $78 \text{ km/h}$ ), podendo causar um efeito maior na detecção de sinais de falha em baixa frequência (entre  $100 \text{ kHz}$  e  $250 \text{ kHz}$ ) devido à fricção e desgaste da superfície de contato da roda à ferrovia e ao aumento da força do ruído aleatório.

Figura 2.19: Espectros de frequência de sinais de ruído a diferentes velocidades.



Fonte: traduzido de (ZHANG et al., 2018).

Pode-se observar que para o sistema da Figura 2.17, com uma taxa de amostragem do sinal igual a  $1\text{ kHz}$ , um grande volume de dados é necessário para processar o sinal de referência e o sinal de leitura. Portanto, é necessário uma boa estação de trabalho para essa tarefa pesada.

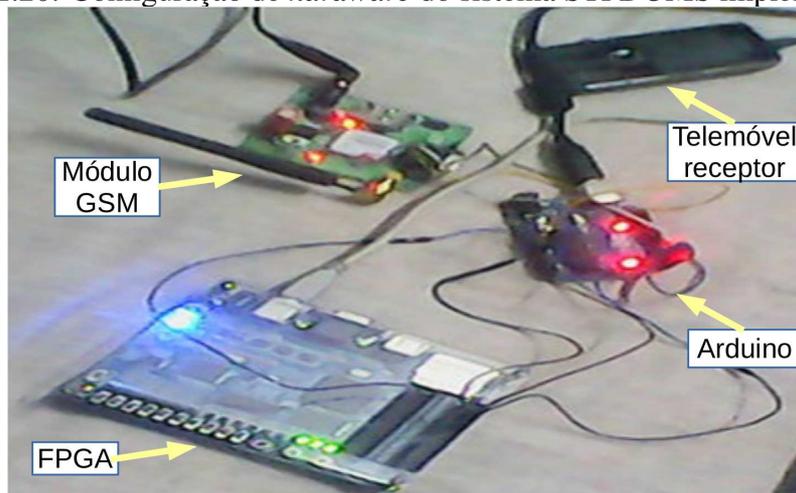
As máquinas rotativas estão presentes na produção de energia e transporte, entre inúmeras outras aplicações. O tempo de inatividade, causado por falhas em componentes tais como rolamentos ou engrenagens, reflete diretamente na viabilidade econômica de grandes sistemas. Sobie, Freitas e Nicolai (2018) abordam diretamente esses desafios gerando dados de treinamento obtidos com simulações dinâmicas de rolamento com falhas e o algoritmo de aprendizagem treinado foi validado com conjunto de quatro dados experimentais. Foram feitas simulações em condições saudáveis e de falha externa para velocidades de 1260, 1500, 1860 e 2220 *rpm*. Durante 50 dias foram coletados experimentalmente dados de falha de rolamento de uma turbina de energia eólica comercial de 2 MW em operação com velocidade do eixo de aproximadamente 1800 *rpm*. Uma barreira que impede sua implantação para o monitoramento de condições através da aprendizagem de máquina (*machine learning*) na indústria, é a sua dependência de dados de falha em serviço (*online*). No entanto, essa pesquisa fornece um ponto de partida ao qual os dados em tempo de execução podem ser adicionados ao algoritmo para melhorar ainda mais o desempenho do classificador.

Em equipamentos de velocidade variável, como turbina de energia eólica e trens, o sinal de vibração adquirido é não-estacionário e não-linear. As técnicas tradicionais de processamento de sinais estacionário são ineficientes para diagnosticar as falhas da máquina em condições que variam no tempo. Maheswari e Umamaheswari (2017) apresentam uma revisão bibliográfica dos métodos desenvolvidos nos últimos 3 anos. Na técnica parametrizada de análise no tempo-frequência, a transformada discreta de *wavelet* (DWT - *Discrete Wavelet Transform*) (WALNUT, 2002) é usada para decompor o sinal em bandas de baixa e alta frequência, uma vez que as assinaturas de falhas em altas frequências do sinal de vibração são difíceis de detectar. Pode-se utilizar em conjunto com outra técnica a exemplo da análise de assinatura atual do motor (MCSA - *Motor Current Signature Analysis*). Nos modelos de observação baseados no conhecimento, os pesos das redes neurais artificiais podem ser ajustados pelo algoritmo de mínimos quadrados médios (LMS - *Least Mean Squares*) (HAYKIN, 2001). Já o filtro adaptativo LMS foi empregado para extrair características estacionárias cíclicas de sinais de vibração e, em seguida, a amplitude demodulada é analisada para encontrar assinaturas defeituosas

de rolamentos danificados.

Conforme Devi e Saravanan (2018), o diagnóstico de falhas em tempo real é importante para turbinas a vapor pois são dispositivos chaves, devido ao fato de que as falhas resultam na redução drástica do fornecimento de energia em uma usina. A Figura 2.20 mostra uma arquitetura de *hardware* implementada em FPGA para uma técnica existente de detecção de falhas de turbina a vapor e sistema de gerenciamento da manutenção (STFDOMS - *Steam Turbine Fault Detection and Operation Maintenance System*) que pode se comunicar, através de uma plataforma de prototipagem eletrônica de *hardware* Arduino, por troca de mensagem de falha em uma rede sem fio (GSM - *Global System for Mobile Communications*) para as plantas localizadas em áreas remotas. Os dados dos sensores são processados continuamente pelo Arduino e um alerta é enviado para uma estação móvel, quando algo for detectado. O diagnósticos de deterioração na eficiência da turbina e consumo (em *kW*) e suas interpretações apropriadas dependem de informações confiáveis de 7 parâmetros que são: fluxo do acelerador, a pressão do acelerador, a pressão do primeiro estágio, a pressão de reaquecimento, a pressão de cruzamento, a eficiência das turbinas de alta e baixa pressão. Foi projetado em linguagem de programação *Verilog* e implementada em *hardware* FPGA um algoritmo para que quando os dados dos sinais estejam além de um limite predefinido (*threshold*), o diagnóstico seja realizado imediatamente.

Figura 2.20: Configuração de *hardware* do sistema STFDOMS implementado.



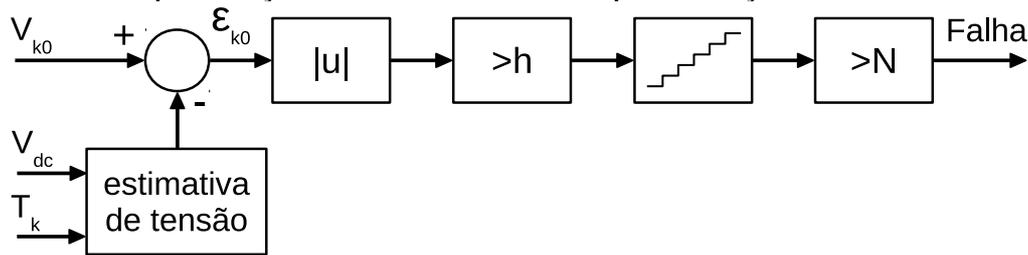
Fonte: traduzido de (DEVI; SARAVANAN, 2018).

Os atuadores eletromecânicos aeroespaciais (EMA - *Aerospace Electromechanical Actuators*), por oferecerem melhor manutenção do que seus equivalentes hidráulicos, ganharam maior relevância na sua utilização em sistemas de propulsão para aeronaves nos

últimos anos. Arriola e Thielecke (2017) investigaram modelos de monitoramento baseados em algumas funções para detectar e isolar falhas críticas. As falhas mais comuns no atuador operando a  $180\text{ Hz}$  foram modeladas de acordo com seus efeitos. Cinco funções de monitoramento, incluindo efeitos parasitas não-lineares atribuídos ao sinal, foram simuladas e detectadas. Foi verificado que as folgas nos componentes do atuador tem impacto forte na definição de limiares de detecção (*threshold*) devido a incertezas (fricção não-linear estática e columbiana).

Em Shahbazi, Poure e Saadate (2018) é apresentada e validada uma interface eletrônica de potência tolerante a falhas para sistemas de energia eólica com geradores de indução duplamente alimentados. As turbinas eólicas estão instaladas em áreas remotas onde sua manutenção é cara e demorada, os dispositivos conversores são apontados como uma das partes mais frágeis e são responsáveis por aproximadamente 14% do tempo de inatividade total das turbinas eólicas. Muitos dos algoritmos de detecção de falhas existentes são ineficientes ou mesmo incapazes de detectar a falha, devido ao fato da corrente do rotor ser insuficiente em baixa frequência. Então, foi empregado um método de detecção de falhas que baseia-se na comparação direta das tensões de polo com valores estimados, ao invés das tradicionais medidas de corrente. Nesse método da Figura 2.21, foram realizadas as primeiras simulações no MATLAB/Simulink, os blocos foram compilados com todas as funcionalidades para blocos de DSP, onde são utilizadas bibliotecas desenvolvidas pela Altera para implementar projetos em FPGAs. Desta maneira, todos os blocos de DSP foram compilados automaticamente e algumas funções não disponíveis na biblioteca foram desenvolvidas em códigos em linguagem de descrição de *hardware* (VHDL - *VHSIC Hardware Description Language*) para serem integradas no projeto. Dependendo dos parâmetros do sistema, é configurado a variável  $N$  no algoritmo de detecção de falhas que depende diretamente do atraso total no *loop* de controle (incluindo sensores, A/D, D/A, FPGA e conversores), que está relacionada também com a duração de um contador. A saída deste contador mede o tempo durante o qual o erro de tensão foi suficientemente alto (maior que 30) para a detecção de falha. Então para uma simulação com taxa de amostragem de  $1\ \mu\text{s}$ , na ocorrência de uma falha por um longo período de tempo, o limite de atraso para o diagnóstico de falha, quando ajustado o parâmetro  $N$  do contador para 30, corresponde a  $30\ \mu\text{s}$ . Essa técnica, com atraso de  $30\ \mu\text{s}$  de detecção foi comparada com outras de monitoramento em Tempo Real com atrasos de  $1,2\ \text{ms}$  e  $6\ \text{ms}$ .

Figura 2.21: Representação do modelo de sistemas para detecção de falhas no Simulink.



Fonte: (SHAHBAZI; POURE; SAADATE, 2018).

Gonçalves et al. (2011) propôs uma implementação em *hardware* de um método de detecção e diagnóstico de falha para uma válvula elétrica. Nesse trabalho, foi considerada uma implementação em parte em FPGA e outra no computador (PC - *Personal Computer*), limitando assim a aplicação do sistema em um cenário de baixo consumo de energia. O atuador foi modelado por um conjunto de equações algébricas e diferenciais, a fim de avaliar, por meio de simulação, o seu comportamento em diferentes condições de operação, incluindo comportamento normal, de degradação e de falhas. A complexidade do método adotado para realizar o diagnóstico com mapas auto-organizáveis pode limitar a aplicação em tempo real.

Os efeitos da válvula elétrica em condições de falha também foram estudados por meio de uma arquitetura de fusão de sensores, correlacionando sinais de torque e vibração por (FACCIN, 2011), resultando em gráficos estatístico para avaliação do mesmo e na identificação das assinaturas características das falhas por (BÖESCH, 2011).

### 2.3.1 Resumo do Estado da Arte

Os métodos de análise de sinais para o monitoramento da condição da máquina e de reconhecimento de padrões com inteligência artificial, têm sido amplamente utilizados para o diagnóstico de falhas, porém, segundo Shao et al. (2017), apresentam três problemas inerentes: (1) os sinais de vibração adquiridos geralmente não são lineares e estacionários. (2) As características sensíveis para aprendizagem são selecionadas manualmente de acordo com o problema específico para capturar automaticamente o diagnóstico da falha. (3) As arquiteturas de redes neurais, em diagnóstico de falhas de máquinas, são difíceis de aprenderem eficazmente e superficiais na representação dos relacionamentos complexos não-lineares. Embora Shao et al. (2017) tenham apresentado uma solução com inteligência artificial adaptável para detecção *online*, boa parte do trabalho deve ser feita

*offline*.

Outro cenário abordado nas pesquisas atuais nos métodos e práticas de diagnóstico de falhas mecânicas é o de não só estabelecer uma série de meios efetivos de detecção de falhas durante o estágio de vida da máquina, mas também monitorar falhas devido aos seguintes aspectos e dificuldades:

- Os sinais sempre sofrem perturbações por múltiplas fontes de ruído e são contaminados por interferência eletromagnética em instalações industriais, resultando em uma baixa relação sinal-ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*) do sinal de falha;
- As falhas com potencial de erro ou em estágio inicial caracterizam-se por sintomas não óbvios e assinaturas de detecção frágeis;
- Abordagens em sistemas com engrenagens de transmissão complexos onde os sensores são instalados externamente na caixa de redução para detectar falhas internas, reduzem os níveis de sinais de falha, levando à difícil identificação da assinatura.

Embora o Estudo de Caso deste trabalho esteja focado em Atuador Elétrico para controle de abertura e fechamento de válvula, a maior parte das máquinas pesquisadas, seja na indústria aeronáutica ou ferroviária, seja na de produção de energia eólica ou de petróleo, opera em frequências próximas (centenas de Hertz) e possui engrenagens ou componentes mecânicos que possam apresentar falhas internas (engrenagens desgastadas, quebradas, rolamentos gastos ou fraturados) ou externas (sobrecarga mecânica, válvula bloqueada) de origem similar.

A Tabela 2.2 mostra um resumo do estado da arte das principais estratégias inteligentes abordadas neste capítulo, apresentando sua plataforma de implementação (PC, FPGA ou ASIC), o tipo de detecção de falha (*offline*, *online* ou tempo real) e o sensor utilizado.

Dentre tantas técnicas existentes, não se pode afirmar qual é a melhor, algumas são extremamente complexas e por isso operam *offline*, outras nem tanto e podem operar *online* e ainda outras têm a capacidade de apresentar resultado em tempo real. O que nenhuma técnica aborda ainda é que, além de todas as qualidades que possa ter, a de consumir a menor energia possível para operar, é essencial para funcionar de forma sustentável.

Tabela 2.2: Estado da arte das principais estratégias inteligentes.

<b>Autor</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Sensor</b>	<b>Plata- forma</b>	<b>Deteccção</b>
Jian et al. (2018)	Atuador hidráulico	eletro- Pressão	PC	<i>offline</i>
Wang et al. (2013)	Motor a diesel	Vibração	PC	<i>offline</i>
Chen, Chua e Lim (2006)	Motor hidráulico	Vibração	PC	<i>offline</i>
Yuan et al. (2017)	Locomotiva	Vibração	PC	<i>offline</i>
Shao et al. (2017)	Locomotiva	Vibração	PC	<i>offline</i>
Rai e Upadhyay (2017)	Máquina rotativa	Vibração	PC	<i>online</i>
Shao et al. (2018)	Locomotiva	Vibração	PC	<i>offline</i>
Hu et al. (2018)	<i>Big Data</i>	Dados brutos	PC	<i>offline</i>
Zhang et al. (2018)	Transporte ferroviário	Emissão acústica	PC	<i>online</i>
Sobie, Freitas e Nicolai (2018)	Turbina eólica	Vibração	PC	<i>offline</i>
Maheswari e Umamaheswari (2017)	Turbina eólica	Vibração	PC	<i>offline</i>
Devi e Saravanan (2018)	Turbina a vapor	Diversos	FPGA	tempo real
Arriola e Thielecke (2017)	Atuadores mecânicos	eletro- Corrente	FPGA	tempo real
Shahbazi, Poure e Saadate (2018)	Turbina eólica	Tensão	FPGA	tempo real
Gonçalves et al. (2011)	Atuador elétrico	Simulado	PC FPGA	<i>offline</i>
<b>Este trabalho</b>	Atuador elétrico	Vibração torque	ASIC FPGA	tempo real

Fonte: o autor.

Em termos tecnológicos, a proposta e o objetivo desse trabalho é contribuir para a área de detecção automática de falhas em sistemas dinâmicos, através da proposta de uma nova arquitetura com características de baixo consumo de energia e de processamento em tempo real, que poderá ser incorporada a um sensor. Para a obtenção desse objetivo, foi projetado um sistema que utiliza algoritmo de otimização estocástico, adaptável para qualquer equipamento mecânico com engrenagens cujas variáveis de estado são desconhecidas ou indeterminadas.

### 3 REVISÃO DE TÉCNICAS E METODOLOGIAS

As ferramentas matemáticas utilizadas atualmente para o desenvolvimento de sistemas de manutenção inteligente (que possam identificar as possíveis falhas, além de gerenciar suas consequências), permeiam as áreas de estatística, processamento de sinais, de inteligência artificial e de filtragem adaptativa. Necessitam, basicamente, de sensores instalados nos equipamentos e o acesso aos sinais gerados por estes, que aliados a aplicativos e simuladores, permitem a análise e predição de eventos de falha.

Neste capítulo, são abordados alguns conceitos e técnicas na área de microeletrônica, utilizados como suporte para este trabalho, visando uma contextualização sobre alguns temas relevantes para sua maior clareza e compreensão. Estão sendo apresentados conceitos básicos relativos ao processamento digital de sinais, sistemas de tempo real, formato de dados e protocolo de comunicação.

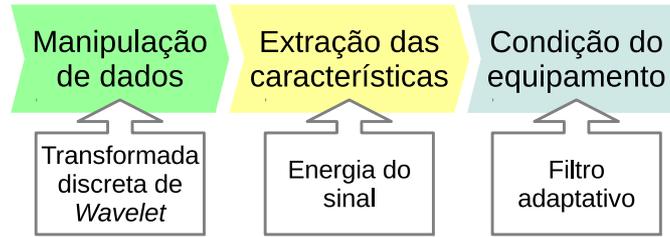
#### 3.1 Métodos de Processamento Digital de Sinais

O processamento digital de sinais (DSP - *Digital Signal Processing*) baseia-se na análise ou modificação do sinal, seja ele analógico ou digital, tornando-o mais apropriado para algumas aplicações como determinação ou predição de algum fenômeno. Se os dados processados forem continuamente monitorados e analisados, pode-se prever qual componente de uma máquina provavelmente irá falhar, reduzindo o tempo de parada para manutenção.

As ferramentas de DSP também são muito utilizadas na extração de características, no reconhecimento de padrões e na detecção e predição de falhas (CHOLETTE et al., 2013), quando usadas em conjunto com técnicas estatísticas, de inteligência artificial ou de filtragem adaptativa.

A Figura 3.1 mostra as três primeiras etapas da manutenção baseada na condição (CBM - *Condition Based Maintenance*) com exemplos de técnicas de DSP utilizadas neste trabalho para identificar falhas em um equipamento. A implementação destes algoritmos será descrita no Capítulo 5, onde também será abordado o algoritmo para FDI (PICCOLI et al., 2015b), desenvolvido com o propósito de tratar uma quarta etapa de CBM, a **avaliação da saúde** do equipamento.

Figura 3.1: Primeiras etapas do CBM para manutenção inteligente.



Nas seções a seguir serão descritos os algoritmos utilizados em cada uma das etapas: **Manipulação de dados**, com a transformada discreta de *wavelet*; **Extração das características**, com energia do sinal; e **Condição do equipamento**, com filtro adaptativo.

### 3.1.1 Transformada Discreta de Wavelet

As *wavelets* possibilitam alterar o tamanho da janela temporal em sinais que apresentam grande variação de frequência, implementando uma janela temporal maior para análise de sinais de baixa frequência e uma menor para as de alta frequência (VALINS, 2004). Assim, a transformada *wavelet* aplica-se para o estudo de fenômenos transitórios, não estacionários ou variantes no tempo (SCHUCK, 1998). A transformada *wavelet* de uma função arbitrária  $f(t)$  é definida pela integral de convolução:

$$w(a, b) = \int_a^b f(t) * \psi_{s,\tau}(t) dt \quad (3.1)$$

Onde a função *wavelet*  $\psi_{s,\tau}$  é dilatada por um fator de escala  $s$  e transladada de  $\tau$  no domínio do tempo. A transformada discreta de *wavelet* de uma função contínua  $f(t)$  é definida como uma discretização de valores amostrados uniformemente em  $k$  períodos deslocados de  $\tau$  numa escala fixa  $s$  de uma exponencial  $2^j$ , cujas dilatações são múltiplas. Portanto, se  $2^j$  assume valores menores que um, detalhes são perdidos e são obtidos informações de baixa frequência. Se maior que um, são obtidos informações de alta frequência.

Portanto, a função *wavelet*  $\psi$  e função de escala  $\varphi$  podem ser expressas como:

$$\begin{aligned} \psi(2^{j-1}, t) &= \sum g_j(k) * \bar{\varphi}(2^j t - k) \\ \phi(2^{j-1}, t) &= \sum h_j(k) * \bar{\varphi}(2^j t - k) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Os coeficientes da função  $\psi$  são calculados a partir dos coeficientes da função  $\phi$  com se segue:

$$\begin{aligned} g_n &= (-1)^n h_{L-1-n} \\ n &= 0, 1, \dots, L-1 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Onde  $L$  é o número de coeficientes. O conjunto de coeficientes  $h_j$  e  $g_j$  define a função escala da *wavelet*.

A análise de *wavelet* consiste na **aproximação** e **detalhes** dos coeficientes. Ela pode ser aplicada a partir da construção de diferentes bases ortogonais. As componentes de baixa frequência são obtidas a partir de valores aproximados e as componentes de alta frequência a partir de aumento no detalhamento.

### 3.1.2 Extração de Energia

Após a transformação do sinal com *wavelets*, a energia resultante dos coeficientes é utilizada para a extração de suas características. Uma vez que exista a condição de conservação da energia pelo equilíbrio de Parseval <sup>1</sup> para a transformada de *wavelet*, o sinal discreto no tempo  $x(n)$  para uma janela  $-N$  a  $N$  é determinada pela expressão a seguir:

$$E_{tot} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=-N}^N |x(n)|^2 \quad (3.4)$$

Onde  $N$  é a amostra cujo total de elementos é  $2N+1$ .

Para sinais periódicos, é mais conveniente computar a energia média ou potência:

$$P_{tot} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{(2N+1)} \sum_{n=-N}^N |x(n)|^2 \quad (3.5)$$

---

<sup>1</sup>Em matemática, o teorema de Parseval comumente se refere ao operador unitário do resultado da transformada de Fourier. A integral do quadrado de uma função deve ser igual a integral do quadrado de sua transformada. Deste modo, a potência média de um sinal pode ser considerada como a soma das potências associadas a cada componente da frequência. Já na transformada de *wavelet*, é requerido também que seja ortogonal em relação as funções dilatadas e transladadas, e que o quadrado do sinal em análise seja integrável.

### 3.1.3 Filtro Adaptativo

O filtro adaptativo atende a critérios, tais como processar sinais estocásticos e detectar anormalidades estatísticas das características dos dados da extração de energia, anteriormente descritos. Dentre as ferramentas de filtragem adaptativa, tais como: os filtros de Wiener, filtros adaptativos ou os filtros de Kalman, destacam-se os filtros adaptativos (HAYKIN, 2001; NEGREIROS, 1994; WIDROW; STEARNS, 1985).

Os filtros adaptativos são filtros com coeficientes que variam ao longo do tempo, adaptando-se automaticamente aos sinais de entrada. Geralmente, o processo de adaptação é baseado em um filtro de resposta a impulso finita (FIR - *Finite Impulse Response*) com método dos mínimos quadrados médios (LMS - *Least-Mean Square*) (HAYKIN, 2001).

#### O Algoritmo Adaptativo LMS com Filtro FIR

Existem duas implementações eficientes adotáveis para filtros de resposta a impulso finita (FIR - *Finite Impulse Response*): implementação no domínio do tempo e implementação no domínio da frequência.

A implementação no domínio do tempo utiliza poucos coeficientes do filtro e efetua a filtragem através de uma convolução do sinal de entrada com estes coeficientes. Esta implementação é bastante eficiente quando a ordem do filtro não é elevada (tipicamente abaixo de 32). Devido a este fato, o algoritmo de mínimos quadrados médios (LMS - *Least Mean Squares*) (HAYKIN, 2001) foi escolhido.

Neste método, o vetor de entrada possui N medidas nos respectivos instantes de tempo. O objetivo do LMS é obter a curva que se aproxime o quanto possível dos dados de entrada. O ponto ótimo é atingido quando a soma dos quadrados da diferença entre os valores estimados ao longo do tempo é minimizada. O filtro adaptativo baseado neste método é descrito pela equação:

$$\begin{aligned} W(n+1) &= W(n) + \mu(n) e(n) X(n) \\ e(n) &= d(n) - W^T X(n) \end{aligned} \tag{3.6}$$

onde  $W(n) = [w_0 \ w_1 \ \dots \ w_{L-1}(n)]^T$   $X(n)$  é o vetor de coeficientes,  $e(n)$  é o erro do sinal  $X(n) = [x[n] \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)]^T$  é a saída do vetor de sinal e  $\mu(n)$  é o tamanho do passo (DINIZ, 2013).

A função  $J$  a ser minimizada é a soma dos quadrados dos erros:

$$J = \sum_{i=0}^n |e(n)|^2 \quad (3.7)$$

O resumo do algoritmo LMS (BOROUJENY, 1998), é apresentado como segue:

Tabela 3.1: Algoritmo do filtro LMS.

<p><b>Dados:</b></p> <p><math>N \rightarrow</math> número de coeficientes;</p> <p><math>\mu \rightarrow</math> parâmetro de adaptação;</p> <p><math>n \rightarrow</math> instante no tempo.</p> <p><math>0 &lt; \mu &lt; \frac{2}{\text{força adaptativa}}</math>,</p> <p>onde <math>\text{força adaptativa} = \sum_{k=0}^{M-1} E[ \mu(n-k) ^2]</math></p>
<p><b>Inicialização:</b></p> <p><math>\mathbf{x}(0) = \mathbf{w}(0) = [0 \ 0 \ \dots \ 0]^T</math></p>
<p><b>Execução:</b></p> <p><math>\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-N+1)]^T</math></p> <p><math>\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{N-1}(n)]^T</math></p> <p><b>Sempre para para <math>n \geq 0</math> {</b></p> <p style="padding-left: 2em;"><i>Filtragem</i> : <math>y(n) = \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n)</math></p> <p style="padding-left: 2em;">ou seja <math>y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n).x(n-i)</math></p> <p style="padding-left: 2em;"><i>Estimação de erro</i> : <math>e(n) = d(n) - y(n)</math></p> <p style="padding-left: 2em;"><i>Coefficiente de Adaptação</i> : <math>\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu\mathbf{x}(n)e(n)</math></p> <p><b>}</b></p>

### 3.2 Sistemas de Tempo Real

Sistemas de tempo real caracterizam-se pela necessidade fundamental de atuar de acordo com a dinâmica de estados do processo. A chave do sucesso em sistemas de tempo real é a oportunidade de execução de tarefas e processamento de dados, normalmente distribuídos e com requisitos rigorosos de tempo, se comunicarem para realizar um objetivo em comum (MALCOLM; ZHAO, 1994).

Tais sistemas não dependem só do resultado lógico de computação, mas também do tempo em que os resultados são produzidos, onde diversas tarefas são executadas e o escalonamento em função das restrições temporais é um grande problema. Tarefas recebem dados de entrada, executam um algoritmo e geram saídas. A tarefa está logicamente correta se gerar uma saída correta em função dos dados de entrada em um prazo temporal pré-determinado (RAMAMRITHAM; STANKOVIC, 1994).

Devido a isso pode-se afirmar que, o tempo é o recurso mais precioso utilizado por sistemas de tempo real, pois as tarefas executadas pelo processador devem ser concluídas antes de seu limite temporal (*deadline*) (SHIN; RAMANATHAN, 1994).

### 3.3 Formato dos Dados de Dispositivos Digitais

Os números empregados no cálculo com dispositivos digitais podem ser de dois tipos: números inteiros e números em ponto-flutuante (números reais em matemática). São representados internamente nestes circuitos em um formato binário, como uma sequência de *0s* e *1s*. Além disso, as operações aritméticas no cálculo computacional utilizam-se de palavras com um número limitado de *bits*. Assim os números são representados somente em uma faixa de  $N$  *bits*.

Um número inteiro decimal pode sempre ser representado exatamente por um inteiro binário, mas isso não é verdade para os números fracionários. Para tratar desta questão, este trabalho adotou o Formato Q.

#### 3.3.1 Notação de Ponto Fixo no Formato Q

O Formato Q da empresa Texas Instrument (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 1988) consiste em transformar os números reais, cujo sistema de numeração

decimal é representado na base binária no computador, do formato em ponto-flutuante para o formato em ponto-fixa.

Neste formato, a primeira parte dos *bits* da palavra é a parte inteira do número, e a segunda, a fracionária. Na Tabela 3.2 está representado um número de 16 *bits* (GAN; KUO, 2007), da direita para esquerda, do menos significativo para o mais significativo. A letra *S* representa o sinal do número, *I* a parte inteira e *F* a parte fracionária.

Tabela 3.2: Representação de números no formato Q.

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
S	I	I	I	I	I	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Para representar os números neste formato, um número no **Formato Q(N.M)** é representado por uma palavra de **B bits**:

$$Palavra = B = N + M \quad (3.8)$$

Tamanho da Palavra do formato Q.

Onde:

- *N bits* é usado para parte de números inteiros;
- *M bits* é usado para parte de números fracionários.

Para converter um número de ponto-flutuante para ponto-fixa, basta multiplicar por  $[2^M]$  e arredondar a parte fracionária:

$$ponto\ fixo = absoluto([2^M] * ponto\ flutuante) \quad (3.9)$$

Conversão de ponto-flutuante para ponto-fixa.

### 3.4 O Protocolo de Comunicação Serial SPI

A comunicação da interface periférica serial (SPI - *Serial Peripheral Interface*) é um protocolo síncrono utilizado para comunicação entre um dispositivo mestre e um ou mais dispositivos escravos. O SPI não permite o endereçamento. A comunicação só pode ser feita entre dois pontos, sendo um deles o dispositivo mestre que é definido em geral como um microcontrolador que fornece o sinal de relógio para o escravo que é composto por um circuito integrado qualquer. Em modo mestre, o microcontrolador além de enviar o sinal de relógio, deve ter um pino de entrada/saída para habilitação de cada periférico.

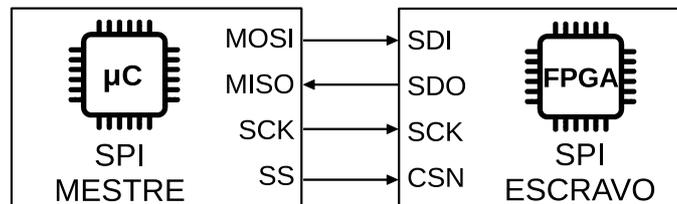
### 3.4.1 Arquitetura de *Hardware* do Protocolo SPI

A arquitetura de *hardware* para o protocolo SPI apresenta duas linhas de controle e duas linhas de dados:

- Linhas de controle: *Chip Select Not* (CSN) e *Serial Clock* (SCK);
- Linhas de dados: *Serial Data In* (SDI) e *Serial Data Out* (SDO).

A transmissão de dados é controlada pelo microcontrolador, selecionando o dispositivo SPI escravo (uma FPGA na Figura 3.2) pelo pino CSN, normalmente ativo em nível baixo, os dados são enviados pelo pino SDO e recebidos pelo pino SDI. Quando o dispositivo não está ativo, seu pino SDO entra em estado de alta impedância.

Figura 3.2: Arquitetura em *hardware* para o protocolo SPI.



Conforme a Figura 3.2, o equipamento mestre com SPI é um microcontrolador, esse opera no modo *full-duplex* e é composto por 4 sinais, a saber na Tabela 3.3 a seguir:

Tabela 3.3: Sinais utilizados no protocolo SPI mestre.

Sinal	Significado	Sentido
MOSI	<i>Master Out Slave In</i>	Mestre → Escravo
MISO	<i>Master In Slave Out</i>	Escravo → Mestre
SCK	<i>Serial Clock</i>	Mestre → Escravo
SS	<i>Slave Select</i>	Mestre → Escravo

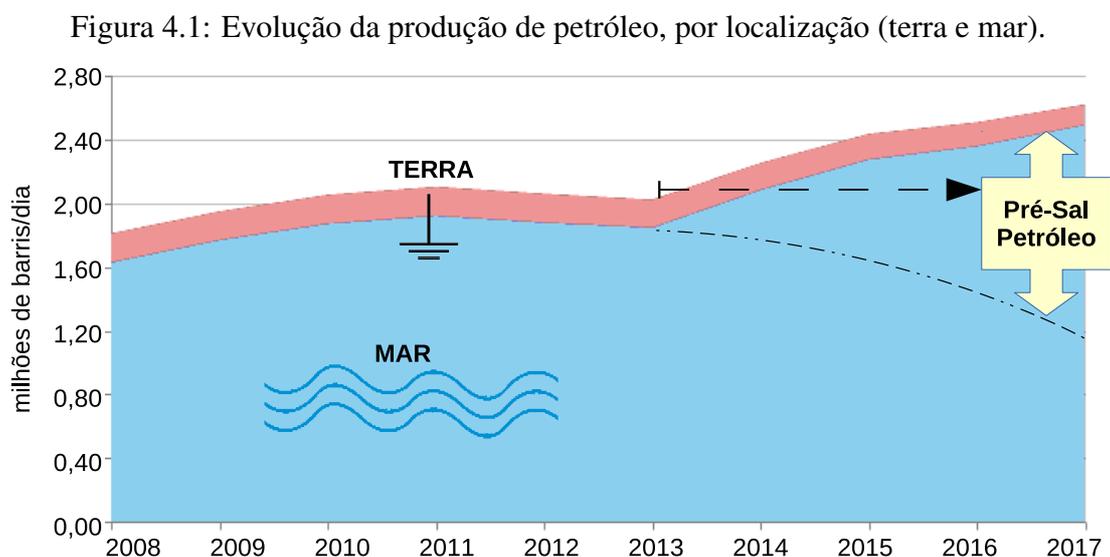
Mais detalhes sobre estes e outros conceitos utilizados no desenvolvimento deste trabalho são encontrados na literatura.

## 4 UTILIZAÇÃO DE VÁLVULAS NO MODAL DUTOVIÁRIO DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Neste capítulo será abordada a logística de abastecimento do sistema Petrobras, com uma atenção especial às operações de terminais e oleodutos, o crescimento da exploração do segmento de petróleo e a relevância do modal dutoviário que possibilita agilidade, segurança e capacidade de fluxo na movimentação dos combustíveis entre refinarias e terminais. Também será abordado o conjunto atuador-válvula como estudo de caso, por ser um equipamento crítico nas operações de transporte e armazenamento de petróleo e derivados.

### 4.1 Oferta e Demanda de Petróleo

A evolução do crescimento da produção de petróleo nacional pode ser observada na Figura 4.1, com destaque ao fato de que a maior parte da produção nacional é extraída de campos marítimos. Cabe ressaltar que uma maior taxa de exploração ocorreu a partir do ano de 2013, após a criação da Pré-Sal Petróleo pela Lei 12.304/10, com destaque para a exploração do pré-sal do campo de Lula (denominado campo Tupi antes de 2010), na Bacia de Santos, relativamente o maior produtor de petróleo e gás com 1,5 milhões de barris de óleo equivalente (óleo e gás) por dia em 2018 (PETROBRAS, 2018).



Fonte: adaptado de (ANP, 2018).

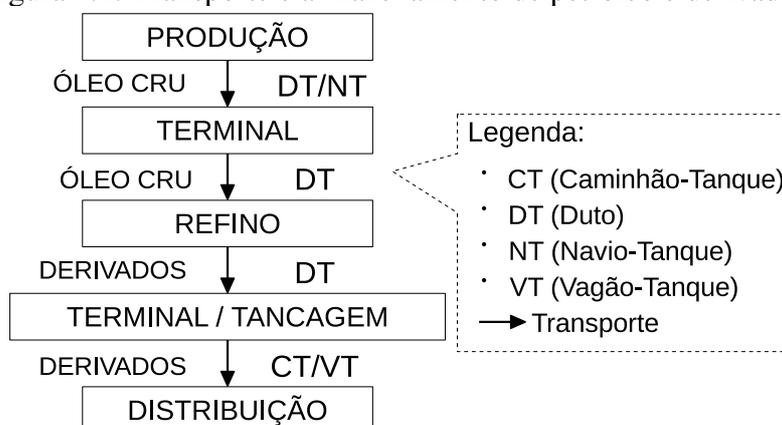
## 4.2 Transporte e Armazenamento de Petróleo e Derivados

O petróleo bruto é separado em frações, processado e convertido em derivados em uma instalação industrial denominada refinaria, que manufatura produtos acabados a partir de petróleo, óleos inacabados, líquidos de gás natural (LGN), álcool e outros hidrocarbonetos.

Uma vez produzidos os derivados de petróleo nas refinarias, esses produtos são transportados por dutos e armazenados em tanques e esferas (no caso de gás) em terminais para posterior distribuição. Nas bases de distribuição, os produtos são vendidos ao mercado, sendo o transporte realizado pelas empresas distribuidoras por meio rodoviário ou então transportados para outras bases de distribuição, via duto, ferrovia ou rodovia.

As operações de transporte e armazenamento da Figura 4.2, permeiam todas as etapas da cadeia produtiva e são realizados pelos modais dutoviário, ferroviário, rodoviário e marítimo, ou seja, por dutos, vagões-tanque, caminhões-tanque e navios-tanque, respectivamente. Cabe a tarefa de distribuição às atividades de transporte dos derivados de petróleo até os pontos de venda (RUSSO, 2004).

Figura 4.2: Transporte e armazenamento de petróleo e derivados.



De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (ANP, 2018), em 2017, o parque de refino brasileiro contava com 17 refinarias, 102 terminais autorizados a funcionar, sendo 55 terminais aquaviários (com 1.403 tanques) e 47 terminais terrestres (com 516 tanques), totalizando 1.919 tanques com capacidade nominal de armazenamento de 13,5 milhões  $m^3$ . Estes números denotam a grande quantidade de componentes existentes para viabilizar a produção e transporte. Conforme o relatório de inovações da Coester (COESTER, 2018), uma empresa fornecedora de atuadores elétricos para a Transpetro (TRANSPETRO, 2018), no ano de 2012, detinha mais

de 15 mil atuadores em operação no mercado.

No que tange o modal dutoviário, o transporte de petróleo é gerenciado pela Transpetro através de um sistema supervisorio, sistemas de supervisão e aquisição de dados (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*) (BOSA, 2009). O sistema possui uma rede de comunicação para monitorar as informações operacionais e permite interatividade para que os técnicos de operação comandem as válvulas e os equipamentos (p. ex., ligar e desligar bombas, abrir e fechar válvulas, alterar fluxo nas malhas, além de detectar vazamentos e realizar as simulações operacionais).

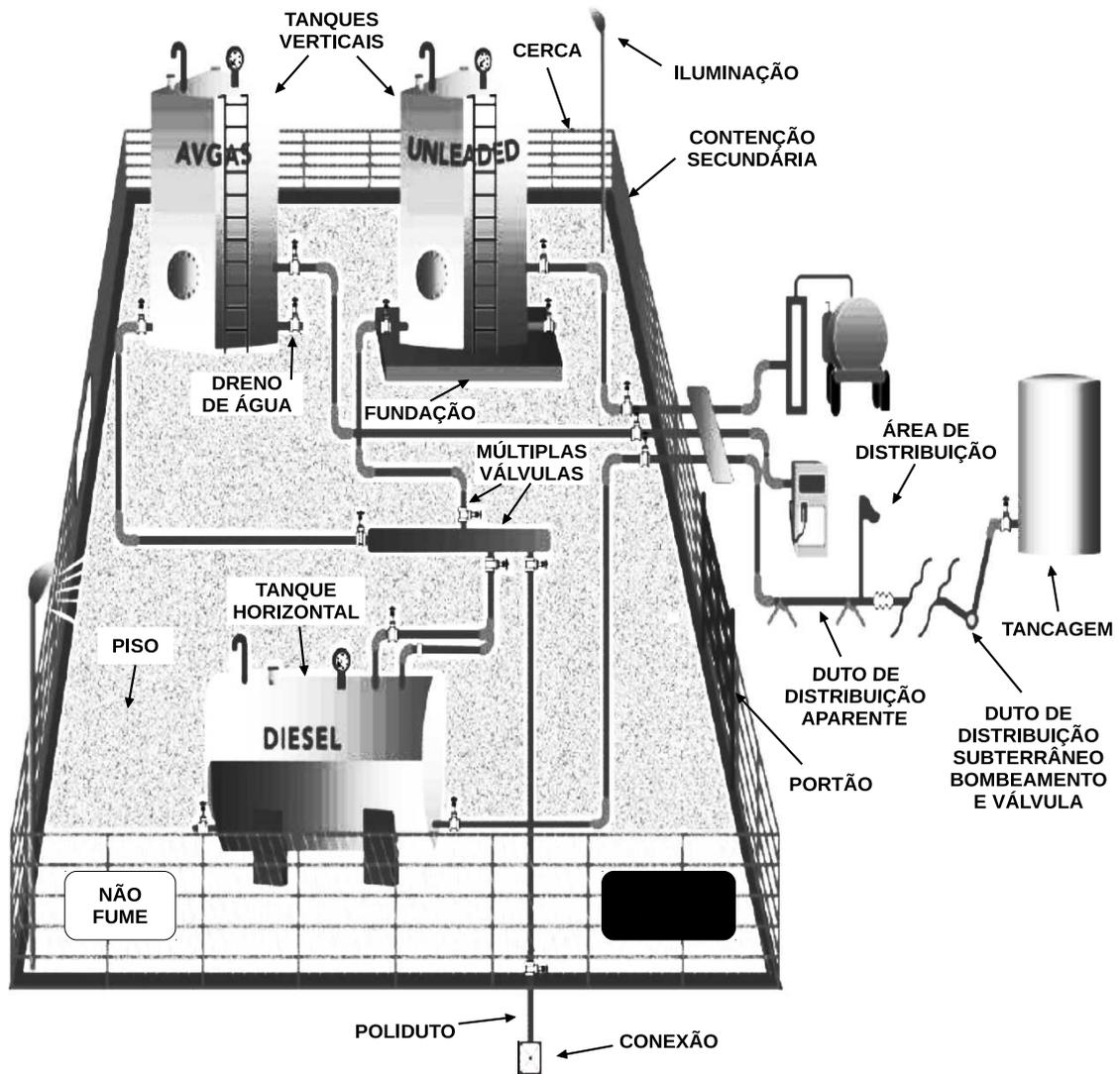
#### **4.2.1 Operações de um Típico Terminal**

Os terminais, conforme exemplo mostrado na Figura 4.2, são de extrema importância dentro da cadeia produtiva, pois são responsáveis por receber, armazenar e enviar os produtos manipulados. A Figura 4.3 mostra um esquema simplificado para um típico terminal contendo os principais componentes utilizados, com destaque do uso de válvulas nas linhas de distribuição e no controle dos tanques de armazenamento.

Ao analisar-se a o fluxo de operação da planta, a detecção de falhas em tempo real de válvulas torna-se especialmente necessário em terminais com polidutos. Nos sistemas de transporte e armazenamento em que a válvula permite a passagem de fluido indevidamente, pode causar a contaminação do conteúdo de um tanque, por exemplo, implicando em sérias perdas econômicas. O bloqueio de passagem do fluido por um válvula quando deveria permitir, também tem um potencial de perda econômica com prejuízo na programação e logística operacional.

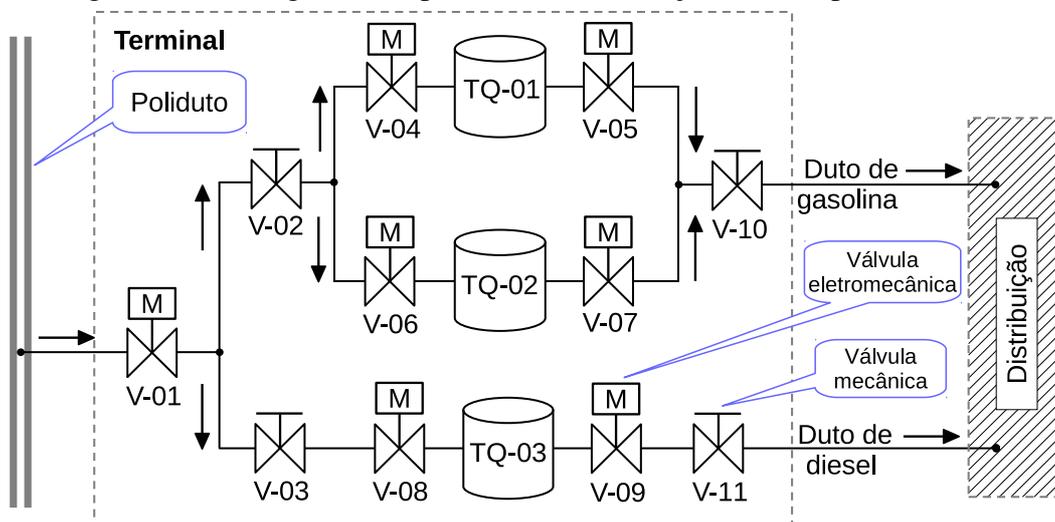
Para estudar o fluxo de uma aplicação em tempo real do transporte de produtos, um modelo simplificado das instalações de um típico terminal (Figura 4.3) é apresentado em forma de fluxograma na Figura 4.4. Fazem parte do modelo não só os tanques, mas principalmente as válvulas, pois elas atuam na passagem ou bloqueio do fluido, determinando o fluxo dentro do processo e qual operação está ocorrendo. Outros equipamentos como bombas, tanques de alívio e auxiliares não foram representados.

Figura 4.3: Componentes de um típico terminal.



Fonte: traduzido de (CONSERVATION, 2016).

Figura 4.4: Fluxograma simplificado da automação de um típico terminal.



No esquema da Figura 4.4, os derivados de petróleo (diesel e gasolina) chegam da refinaria através de um poliduto (oleoduto que transporta múltiplos produtos). As setas indicam a direção e sentido do fluxo da gasolina ou diesel recebidos ou enviados. As válvulas direcionam os produtos para serem armazenados em tanques específicos (TQ-01, TQ-02 ou TQ-03) e, posteriormente, enviados para as companhias distribuidoras.

Existem vários tipos e modelos de válvulas para a operação de um terminal. O esquema simplificado apresentado na Figura 4.4, ilustra dois tipos de válvulas: uma com símbolo de uma letra “M” para válvulas eletromecânicas com motores, aos quais possuem sensores e instrumentação para indicação de sua posição em tempo real; outras são válvulas com apenas componentes mecânicos que deverão ser acionadas manualmente em caso de alguma falha nas válvulas eletromecânicas.

As válvulas eletromecânicas V-04 a V-7 são responsáveis pelo recebimento, armazenamento e envio de gasolina dos tanques TQ-01 e TQ-02, enquanto as válvulas eletromecânicas V-08 e V-09 são responsáveis pelas mesmas operações para o tanque TQ-03 com óleo diesel.

Alguns importantes cuidados operacionais devem ser levados em conta:

1. Para o melhor controle de volume enviado e para evitar que produtos de diferentes especificações se misturem, dois ou mais tanques não podem ao mesmo tempo enviar para a mesma companhia;
2. Da mesma forma, dois ou mais tanques não podem receber produtos ao mesmo tempo da refinaria, pois cada produto possui suas próprias especificações e qualidades.

Deste modo, o terminal realiza basicamente dois procedimentos operacionais, o de receber para armazenar e o de enviar o estoque. Com o devido cuidado operacional, é possível realizar a medida de volume dos produtos transportados, sua identificação, rastreamento e evitar que os produtos armazenados se misturem, mediante as seguintes operações:

- **Operação de recebimento:** um produto chega através do poliduto (diesel ou gasolina) para um tanque correspondente. Para o recebimento de gasolina no tanque TQ-01 e evitar que o produto seja enviado para outros tanques, por exemplo, as válvulas V-01, V-02 e V-04 deverão permanecer com obturador aberto e as válvulas V-06 e V-08 deverão permanecer com obturador fechado. A válvula V-05 também deverá estar com obturador fechado para que o produto não escoe para as compa-

nhas distribuidoras ou então contamine o combustível do tanque TQ-02.

- **Operação de Envio:** determinado produto (diesel ou gasolina) é enviado de um tanque para uma companhia distribuidora. Para o envio de gasolina do tanque TQ-02, por exemplo, as válvulas V-02 e V-10 deverão permanecer com obturador aberto. A válvula V-05 deverá permanecer com obturador fechado para impedir o escoamento do produto ao TQ-01, assim como a válvula V-06 também deverá permanecer com obturador fechado para impedir entrada de produto no tanque TQ-02.

A Tabela 4.1 apresenta as possíveis operações de envio e recebimento de produtos com as determinadas posições das válvulas (esquema da Figura 4.4), observando os devidos cuidados operacionais citados anteriormente.

Tabela 4.1: Procedimentos operacionais de um típico terminal.

Tanque	TQ-01		TQ-02		TQ-03	
	Envia	Recebe	Envia	Recebe	Envia	Recebe
<b>V-01</b>	A	-	A	-	A	-
<b>V-02</b>	A	-	A	-	-	-
<b>V-03</b>	-	-	-	-	A	-
<b>V-04</b>	A	F	F	-	F	-
<b>V-05</b>	F	A	-	F	-	-
<b>V-06</b>	F	-	A	F	F	-
<b>V-07</b>	-	F	F	A	-	-
<b>V-08</b>	F	-	F	-	A	F
<b>V-09</b>	-	F	-	F	F	A
<b>V-10</b>	-	A	-	A	-	-
<b>V-11</b>	-	-	-	-	-	A

Legenda: Válvula com obturador aberto (A); Válvula com obturador fechado (F).

Dentro dos ciclos de operação dos sistemas de transporte e armazenamento em terminais, as válvulas sofrem inúmeras perturbações que caracterizam o processo como dinâmico. A implementação de técnicas de detecção de falhas em tempo real ou *online* permite, por exemplo, que operadores da planta suspendam uma operação, programem uma manutenção ou simplesmente acionem válvulas mecânicas de emergência como é o caso das válvulas V-02, V-03, V-10 e V-11 do esquema da Figura 4.4.

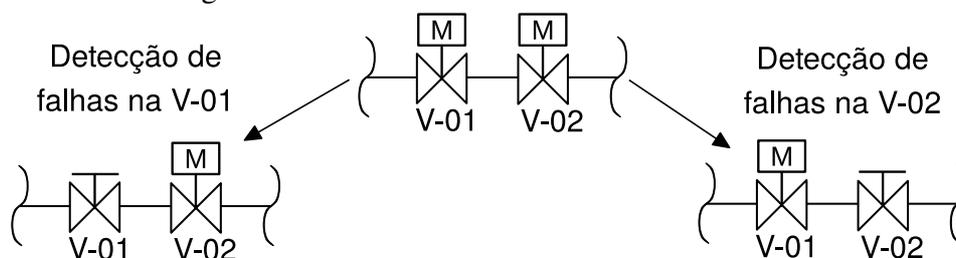
Note-se que as válvulas mecânicas também necessitam de sistemas de detecção de falhas, pois podem apresentar desgastes nas engrenagens de redução para abertura e

fechamento manual. Na seção 4.3.2 foram abordadas as forças que atuam sobre a válvula e favorecem a abertura do obturador, sendo no entanto, o vazamento o principal problema.

O esquema abordado pode ter uma nova configuração com maior confiabilidade ao se adotar o uso de recurso redundante, ou seja, possibilitar que o sistema tolere a parada ou o mau funcionamento de uma válvula. Então uma segunda válvula estará imediatamente disponível para uso quando uma válvula primária do sistema apresentar falha.

A Figura 4.5 ilustra uma segunda válvula alternativa V-02 em série com V-01. No caso de detecção de falhas em uma válvula ou da necessidade de proteção, essa poderá ser desativada e permanecer mecanicamente com obturador aberto no modo manual para posterior desacoplação e manutenção do atuador elétrico. Então a operação remota do sistema supervisorío, por exemplo, será transferido integralmente à segunda válvula.

Figura 4.5: Redundância com válvulas em dutos.



No caso de detecção de falhas em ambas as válvulas, simultaneamente as mesmas deverão ser desativadas para posterior desacoplação e manutenção do atuador elétrico. Nesse último caso, enquanto a manutenção é realizada, a planta deverá conter também válvulas paralelas na tubulação que isolem esse ponto do sistema da rede. Em uma grande instalação industrial, por exemplo, poderá existir também válvulas direcionais na tubulação para o produto ser distribuído a outros pontos da rede enquanto o processo apresentar falhas.

### 4.3 Visão geral do Estudo de Caso

As válvulas estão presentes nas mais diversas aplicações e têm como finalidade controlar o fluxo de fluidos em uma tubulação (água, esgoto ou petróleo). Uma planta industrial pode conter centenas de válvulas. Um setor específico como o petroquímico ou de saneamento básico pode conter milhares de válvulas instaladas. Existem diversos tipos de válvulas: gaveta, esfera, ou globo, cada uma indicada para um tipo de aplicação em particular. Podem estar operando sob condições de pressão e temperatura altas, por

exemplo, ou mesmo em locais remotos com acesso difícil ou demorado.

No exemplo de um típico terminal na seção anterior 4.2.1, a integridade do funcionamento das válvulas é uma questão estratégica, visto que uma indisponibilidade operativa pode representar, em termos de custos, muitas vezes mais do que custaria reparar a própria falha. Em geral, quando as válvulas falham de forma indesejada, podem causar grandes prejuízos no modal dutoviário. Logo, é importante que se tenha informações sobre o estado do equipamento com a antecedência necessária para que a equipe de manutenção planeje e chegue antes da falha (HENRIQUES et al., 2010).

### 4.3.1 Estudo de Caso deste Trabalho

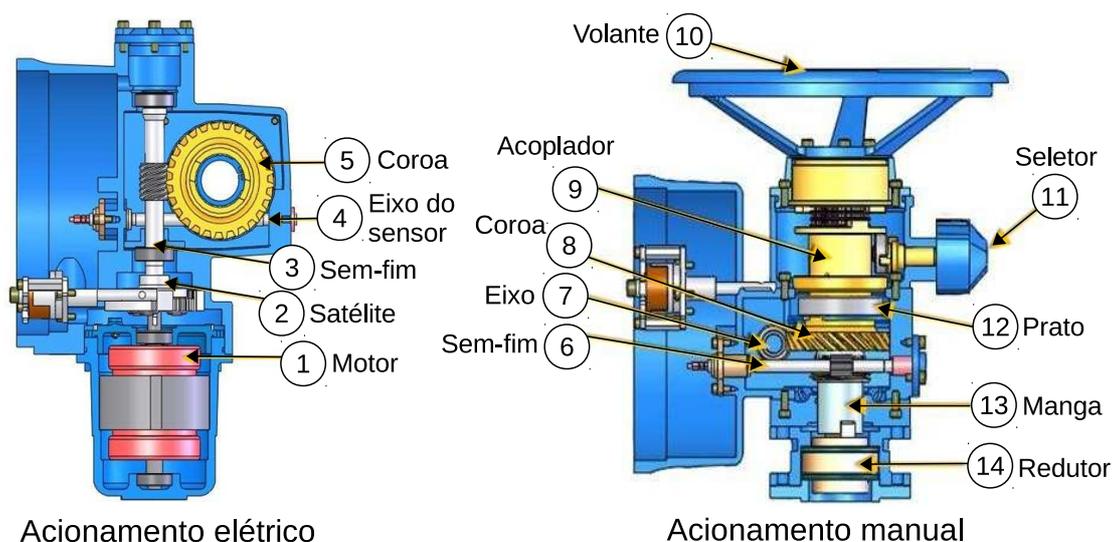
Atuadores elétricos são dispositivos eletromecânicos capazes de controlar o nível de abertura de válvulas, *dampers*, comportas e similares. O atuador elétrico pode ser acoplado através de unidades de adaptação ou redutores, sendo sua principal função o controle do movimento da haste da válvula, que controla o fluxo de produto dentro da tubulação em que atua (COESTER AUTOMAÇÃO, 2001).

Externamente o dispositivo é composto por uma carcaça, com volante mecânico manual, um acoplamento para válvula com caixa de engrenagens, uma caixa de bornes para conectar o motor a um compartimento de circuito eletrônico de controle de acionamento do atuador e um painel frontal com visor e comando local, conforme a Figura 4.6.



A representação esquemática da Figura 4.7, apresenta os componentes internos dos atuadores da linha CSR <sup>1</sup>, com sistema de engrenagens diferenciais que garantem auto-travamento, alta capacidade de redução e acionamento manual através de acoplamento com alavanca. Cada item está numerado na figura sendo que os componentes de (1) a (5) destinam-se ao acionamento elétrico e os componentes de (6) a (12) ao acionamento manual e mecânico.

Figura 4.7: Detalhes construtivos dos atuadores.



Fonte: Coester (COESTER AUTOMAÇÃO, 2001)

O sistema de transmissão mecânica apresenta três tipos de reduções cinemáticas, denominadas de primária, secundária e terciária: O motor (1), responsável pelo movimento do equipamento, aciona o conjunto das engrenagens satélites (2), nas quais se processa a redução primária. O movimento continua no par sem-fim (3) e coroa (5), que acionam o acoplador deslizante (9), responsável pelo movimento da manga de saída (13) ocorrendo então a redução secundária. Uma terceira redução ocorre no redutor de saída (14) acoplado à saída da manga. O Volante manual (10), responsável pelo movimento do equipamento, aciona o acoplador deslizante (9), quando o *knob* seletor (11), estiver na posição comando manual. Caso seja acionado o comando elétrico, o comando manual é automaticamente desativado através do prato de desacoplamento (12), garantindo total segurança ao operador.

O atuador elétrico deste estudo de caso é um modelo inteligente CSR6, o mesmo utilizado nos trabalhos de (FACCIN, 2011), (BÖESCH, 2011), (LAZZARETTI, 2012),

<sup>1</sup>As soluções da linha CSR da empresa Coester, se aplicam às válvulas tipo gaveta, globo e outros equipamentos similares (COESTER, 2018).

(GIACOMOLLI, 2014), (STEIN, 2014), (MARIMON, 2014) e (ROCHA, 2016) com capacidade máxima de 60  $N.m$ , motor tipo gaiola de esquilo para o acionamento, rotação de 42  $rpm$ , carcaça em alumínio *Copper Free*, controle inteligente através de uma unidade de processamento local, sensores e sistema de autodiagnóstico, além de capacidade de comunicação via uma rede *Modbus*. As especificações desse atuador estão resumidas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Especificações do atuador elétrico modelo CSR6.

Atuador CSR6	Unidade	Valor
Torque máximo	$N.m$	60
Torque de trabalho	$N.m$	60
Tensão de operação	$V$	220
Tempo de operação	$s$	46
Rotação	$rpm$	42
Potência do motor	$kW$	0,18
Rotação do motor	$rpm$	3600

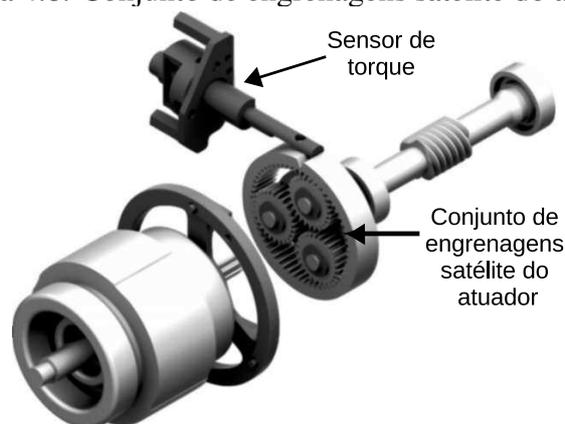
A função de autodiagnóstico disponível nos atuadores inteligentes da Coester é a de monitorar e detectar diversos problemas tais como, o torque excessivo exercido sobre a válvula, sobreaquecimento e falta de fase do motor.

Os atuadores inteligentes podem registrar as 500 últimas operações realizadas na sua memória interna com os valores de torque exercido na haste (com resolução de 1  $N.m$ ) por percentual de abertura da válvula (a cada 5% de abertura) para posterior análise. O torque máximo exercido pelo atuador é dado pelo modelo do atuador, mas o limite em que o atuador cessa o movimento pode ser configurado por *software* (COESTER AUTOMAÇÃO, 2001).

O sistema de transmissão mecânica do atuador em estudo é formado por quatro tipos de engrenagens cilíndricas projetadas para transmitir movimento: uma de dentes retos, um par coroa sem-fim e um conjunto de engrenagens helicoidais e planetárias (formando um sistema de transmissão diferencial) (GONÇALVES et al., 2011).

As engrenagens cilíndricas de dentes retos internos fazem parte do conjunto de engrenagens satélite do atuador. O conjunto apresentado na Figura 4.8 é responsável pela transmissão do movimento do motor para a haste da válvula, onde encontra-se posicionado também o sensor de torque.

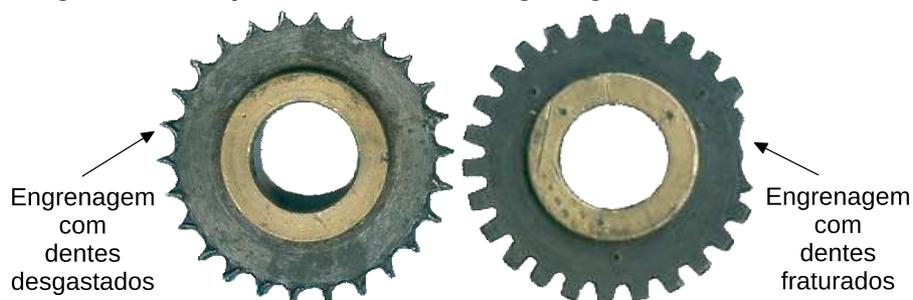
Figura 4.8: Conjunto de engrenagens satélite do atuador.



Fonte: Coester (COESTER AUTOMAÇÃO, 2001)

Devido ao sistema de redução cinemática, o conjunto de engrenagens satélite do atuador realiza grande esforço. Com o decorrer do tempo e da utilização dos atuadores em campo, verifica-se a ocorrência de desgaste ou fratura de dentes nas engrenagens solicitadas ou até mesmo quebra do eixo sem-fim devido ao torque excessivo. Um conjunto defeituoso de engrenagens cilíndricas de dentes retos, cedido pela empresa Coester, é ilustrado na Figura 4.9.

Figura 4.9: Conjunto defeituoso de engrenagens do estudo de caso.



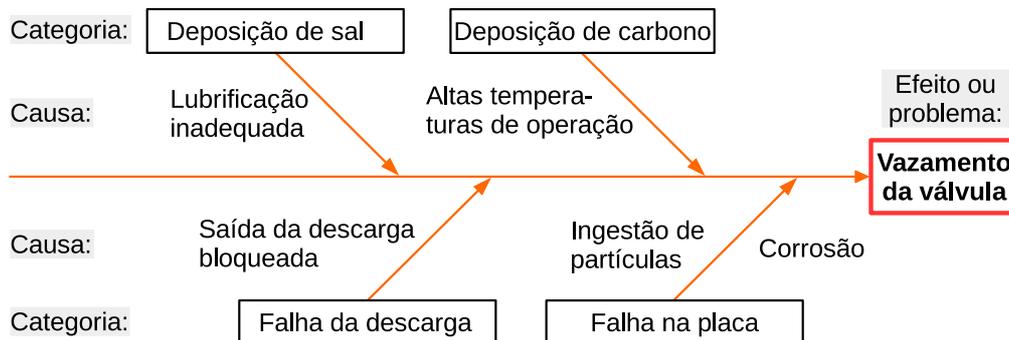
Fonte: (FACCIN, 2011; BÖESCH, 2011; PICCOLI et al., 2012)

### 4.3.2 Trabalhos Relacionados ao Estudo de Caso

À medida que os equipamentos no transporte dutoviário são utilizados, ficam sujeitos a vários tipos de degradação: desgaste, sujeira, corrosão, rachaduras e outras anomalias. Os trabalhos (GONÇALVES et al., 2011; BOSA, 2009) em parceria com as empresas Transpetro e Coester utilizaram ferramentas para análise de uma manutenção centrada em confiabilidade RCM (*Reliability Centred Maintenance*) e realizaram um le-

vantamento histórico de manutenção, aplicando técnicas quantitativas para determinação de componentes mais críticos no sistema. Então foi aplicado método qualitativo por diagramas de causa-efeito (FMECA - *Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*) ao estudo de caso escolhido no estágio anterior. O diagrama gerado é mostrado na Figura 4.10, onde são associados possíveis modos de falha em atuadores elétricos acoplados a válvulas de dutos da Transpetro com um risco em potencial, ou seja, o vazamento da válvula.

Figura 4.10: Diagrama de causa-efeito para identificar possíveis modos de falha no conjunto atuador-válvula.



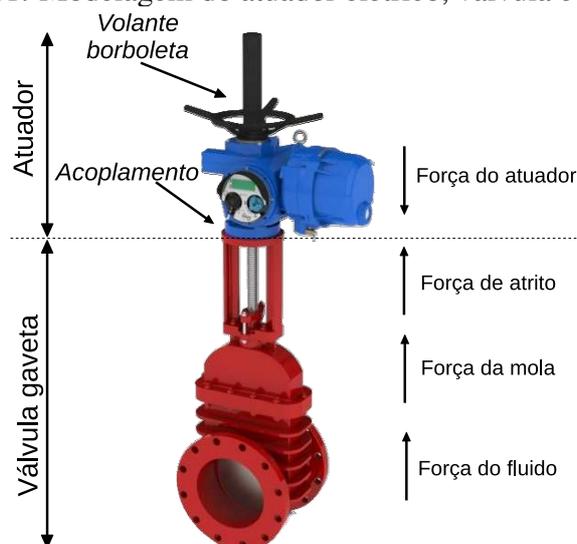
Fonte: (GONÇALVES et al., 2011)

As falhas no conjunto atuador válvula têm as mais diversas causas que variam de defeitos internos na válvula (desgastes nas engrenagens, umidade, corrosão, etc.), defeitos no atuador elétrico (rompimento de bobina do motor, rolamentos, curtos circuitos, umidade, sobre torque, etc.) até defeitos internos no obturador (obstrução do obturador, sedimentos na base, vazamentos, etc.) (BOSA, 2009).

### Trabalhos com Modelagem Matemática

Foi realizado em Gonçalves et al. (2011) uma modelagem do estudo de caso, com uma série de forças que atuam para que ocorra o movimento de abertura ou fechamento do obturador da válvula. As forças são mostradas na Figura 4.11, onde: A força de atuador é aquela transmitida pelo motor através do sistema de engrenagens; a força de atrito corresponde ao atrito existente entre a haste e a gaxeta (peça usada para impedir vazamentos); a força da mola serve para fazer com que a gaveta da válvula retorne à sua posição inicial na ausência de alimentação; a força do fluido que é determinada a partir do escoamento de um fluido através da tubulação.

Figura 4.11: Modelagem do atuador elétrico, válvula e tubulação.



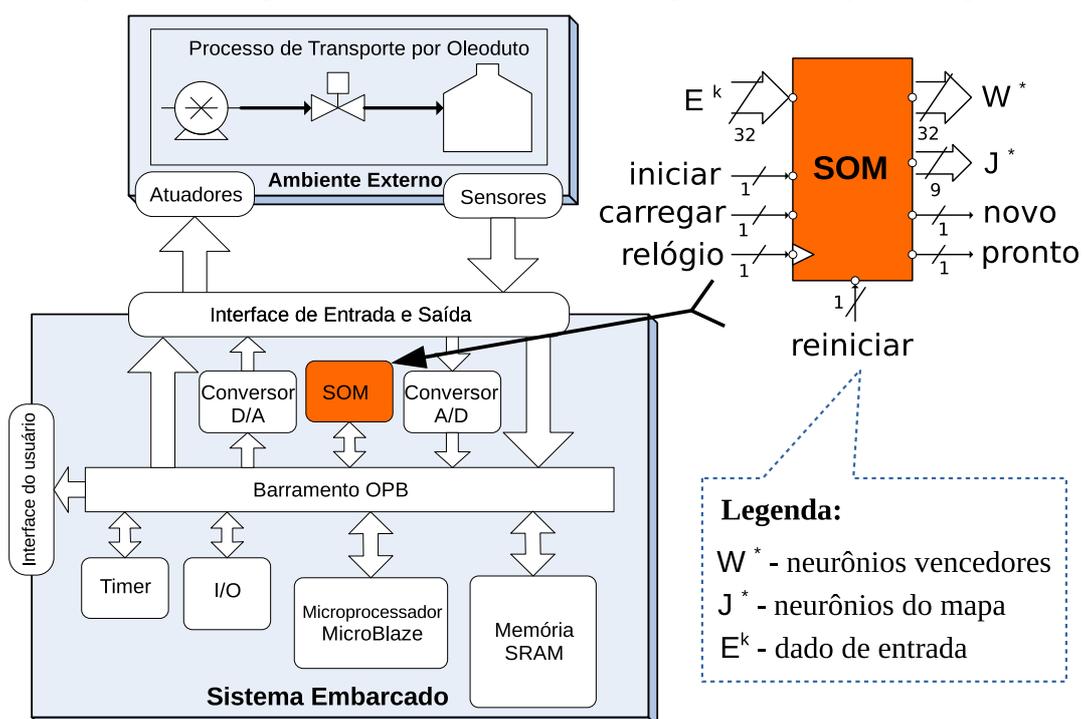
Fonte: adaptado de (COESTER AUTOMAÇÃO, 2001; GONÇALVES et al., 2011).

Juntamente com a ferramenta *Watchdog Agent* (DJURDJANOVIC; LEE; NI, 2003), foram implementados em MATLAB (*MATrix LABORatory*) o modelo matemático com dados de torque do atuador e posição do obturador da válvula (GONÇALVES et al., 2011; BOSA, 2009). A ferramenta *Watchdog Agent* possui um conjunto de ferramentas para o processamento de sinais (transformada *wavelet packet*), a extração de características e o recurso de fusão de dados de sensores. Quando bem treinada pelo operador, realiza cálculos de desempenho (método da regressão logística e de reconhecimento estatístico de padrões), predição de falhas e diagnóstico de saúde dos equipamentos. Então, foram realizadas simulações das condições de comportamento do atuador e válvula (normal, degradação e falha) com injeção de falhas, alterando os parâmetros  $K_h$  (coeficiente de redução cinemática na haste),  $K_m$  (coeficiente de Hook da mola) e  $C_a$  (constante de atrito entre a haste e a gaxeta da válvula gaveta) do modelo matemático.

Bosa (2009) construiu um protótipo implementado em linguagem de descrição de *hardware* (VHDL - *VHSIC Hardware Description Language*) do algoritmo de mapa auto-organizável (SOM - *Self-Organization Maps*) sintetizável em FPGA. A Figura 4.12 mostra a arquitetura do sistema embarcado para prototipar o sistema de manutenção inteligente em uma placa de desenvolvimento FPGA da Xilinx. O SOM é um tipo de Rede Neural utilizado para representação de dados multidimensionais, o que facilita a visualização de grande quantidade de informações. O neurônio vencedor (W) tem a função de localizar a menor distância Euclidiana no padrão do mapa (J) e atualizar a vizinhança para uma representação gráfica que permita a visualização topológica de neurônios cooperati-

vos. Então, para desempenhar as tarefas de detecção de anormalidades e diagnóstico de falhas no estudo de caso, os dados de entrada aplicados nesse protótipo foram os sinais de energia (obtidos a partir da transformada *wavelet packet*) gerados na ferramenta *Watchdog Agent*.

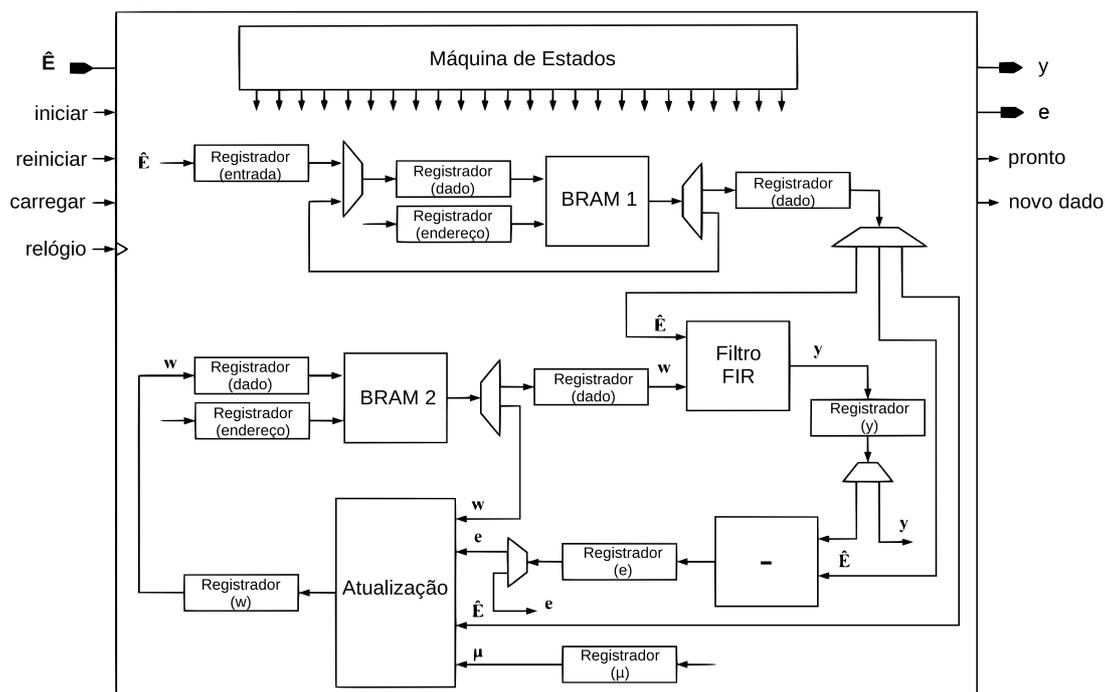
Figura 4.12: Arquitetura do sistema embarcado para manutenção inteligente.



Fonte: adaptado de (BOSA, 2009; GONÇALVES et al., 2011).

Em Gonçalves et al. (2011), os sinais de energia (obtidos a partir da transformada *wavelet packet*) gerados na ferramenta *Watchdog Agent* além de serem repassados ao SOM embarcado da Figura 4.12, também foram aplicados a filtragem adaptativa para a realização das etapas de detecção, classificação, previsão de falhas e determinação do tempo de vida útil do atuador elétrico. A Figura 4.13 mostra a arquitetura do filtro adaptativo e a máquina de estados do circuito de previsão do VHDL embarcado. Comparativamente, os resultados de desempenho do SOM e filtro adaptativo foram satisfatórios e aproximadamente iguais em termos qualitativos nas tarefas de detecção e previsão de falhas. Nos termos de número de *Slices*, *Flip Flops*, *Luts*, blocos de entrada/saída e de memória (*BRAM - Block Random Access Memory*) utilizados, o circuito desenvolvido a partir do filtro adaptativo ocupou uma área menor na FPGA e apresentou menor tempo de processamento em relação ao circuito SOM.

Figura 4.13: Arquitetura do circuito de predição com filtro adaptativo.



Fonte: (GONÇALVES et al., 2011).

## Trabalhos com Bancada de Teste

Uma bancada de testes foi desenvolvida em HENRIQUES et al. (2010), no âmbito de um projeto de pesquisa cooperativa entre o Grupo de Controle Automação e Robótica (GCAR) com as empresas Transpetro e Coester, para realizar ensaios e experimentos de degradação real dos componentes de um atuador eletromecânico para válvulas. São descritos na seção 6.4 os procedimentos utilizados, neste e demais trabalhos (FACCIN, 2011; BÖESCH, 2011; PICCOLI et al., 2013a; LAZZARETTI, 2012; GIACOMOLLI, 2014; STEIN, 2014; MARIMON, 2014; ROCHA, 2016), para emular possíveis esforços que a válvula sofre de acordo com a passagem de fluido no tubo e falhas comuns encontradas na aplicação no campo, onde o equipamento se torna suscetível à ação de degradação, tais como envelhecimento, corrosão, rachaduras e danos causados por operadores.

Faccin (2011) realizou a análise dos tipos de falha na abertura e fechamento da válvula com fusão de sensores. O procedimento de fusão de sensores seguiu as etapas: processamento de sinais (pacotes *wavelets*), extração de características (energia do sinal) e avaliação de desempenho (regressão logística). Para esta tarefa, a ferramenta *Watchdog Agent* foi utilizada e comparada em duas plataformas diferentes, LabVIEW e MATLAB. Na técnica, também foi calculado para cada sensor (de torque e vibração) o valor pico-a-

-pico, o pico máximo, o pico mínimo, o nível de corrente contínua, o valor da raiz quadrada da média (RMS - *Root Mean Square*), média aritmética e dados estatísticos como a obliquidade e curtose. As falhas injetadas pelo freio apresentaram notórias alterações no valor RMS dos sensores, já os sensores com acelerômetro apresentaram alterações de frequência com engrenagens de dente desgastado ou fraturado. Por fim, demonstrou que se projetada corretamente, a arquitetura de fusão de sensores pode melhorar a qualidade do sensoriamento do processo.

Böesch (2011) apresentou um sistema elaborado com rotinas em MATLAB para detecção de falhas aplicado aos dados coletados de sensores com a bancada de teste. O programa analisou se há correlação cruzada de cada sinal com os sinais de referência, tanto de falha quanto de operação normal e se apresentam características identificáveis às assinaturas das falhas inseridas no sistema. Foi verificado os sinais de vibração para operação do sistema em condição normal e na presença de falhas, como por exemplo engrenagens desgastadas ou quebradas, onde apareceram frequências de vibração maiores do que em operação normal.

Utilizando ferramentas de geração automática de código, Lazzaretti (2012) converteu os algoritmos (energia da transformada *wavelet packet* e regressão logística) disponíveis na ferramenta *Watchdog Agent* em *software* ou *hardware* embarcado. Entre as plataformas MATLAB (com MATLAB Coder, Embedded Coder e HDL Coder) e LabVIEW (com CompactRIO) utilizadas para gerar o *hardware* embarcado, obteve êxito apenas com uma ferramenta para linguagem de descrição de *hardware* (HDL Coder - *Hardware Description Language Coder*) do MATLAB aplicado ao algoritmo de regressão logística. Enquanto para *software* embarcado, obteve êxito com ambos algoritmos (energia da transformada *wavelet packet* e regressão logística). O desempenho dos sistemas de manutenção gerados em *software/hardware* embarcados foram comparados através de parâmetros como tempo de execução e ocupação de memória ou de área na FPGA. O monitoramento dos dados de vibração em conjunto com as técnicas de processamento de sinais utilizadas no sistema de manutenção inteligente *Watchdog Agent* mostrou-se capaz de detectar corretamente as falhas induzidas no atuador.

Em continuidade ao trabalho de fusão de sensores aplicada à manutenção inteligente (FACCIN, 2011), Marimon (2014) comparou a ferramenta *Watchdog Agent* nas plataformas LabVIEW e MATLAB. A versão da ferramenta *Watchdog Agent* para LabVIEW foi mais indicada para o controle e análise do sistema analisado, pois permitiu melhor compatibilidade e versatilidade. Os testes realizados com a válvula operando e

realizando os ciclos apresentaram resultados expressivos, através do monitoramento em tempo real ativando um sinal amarelo ou vermelho para indicar quando o sistema necessita de manutenção. Também foi realizada uma análise de viabilidade econômica considerando o custo de implementação do sistema e a economia obtida com a substituição da terceirização do serviço de manutenção preditiva, indicando uma recuperação estimada do investimento do sistema na empresa em cerca de 20 meses.

O trabalho de Rocha (2016) descreve uma abordagem para auxiliar na determinação dos ciclos de vida do produto com sinais de vibração coletados em tempo real. Através de assinaturas de diferentes tipos de falhas, são analisadas sua variação entre amostras de um mesmo lote e classificadas por tipos diferentes de falha. Com a identificação das falhas e seus respectivos componentes, foi determinado o estado do equipamento dentro da curva de tempo início da vida (BOL - *Beginning-of-Life*), meio da vida (MOL - *Middle-of-Life*) e fim da vida (EOL - *End-of-Life*). A abordagem proposta foi construída em cima de experiências anteriores (LAZZARETTI, 2012; MARIMON, 2014) em desenvolvimento no projeto de Integração de Sistemas Inteligentes de Manutenção e Cadeia de Fornecimento de Peças Sobressalentes (I2MS2C). Descartando a fusão de sensores na análise, no experimento foram utilizados apenas os dados do acelerômetro acoplado ao eixo do motor do atuador. Pois, conforme outros estudos (LAZZARETTI, 2012), estes apresentam os melhores resultados na detecção de degradação das engrenagens do atuador.

Stein (2014) desenvolveu um módulo com objetivo de ampliar as capacidades existentes na ferramenta *Watchdog Agent*. Para isso, introduziu um código em MATLAB capaz de estimar o tempo de vida útil de uma determinada peça, analisando dados obtidos de sensores de vibração acoplados à válvula elétrica. A partir do uso de modelo autorregressivo de médias móveis (ARMA - *Auto-Regressive Moving Average*), pôde determinar uma provável data de quebra de uma peça ou equipamento baseando-se no comportamento prévio (no caso, dados obtidos por simulação a partir de um padrão de degradação adotado). O módulo desenvolvido para predição de saúde em MATLAB, tem a possibilidade de oferecer informações para uma redução de custos do processo de manutenção. O sistema permite a redução de gastos com estoques, insumos e matéria-prima no ambiente de produção, por exemplo, pois os sistemas de otimização de cadeias de suprimento obtêm as informações reais necessárias para a reposição de peças.

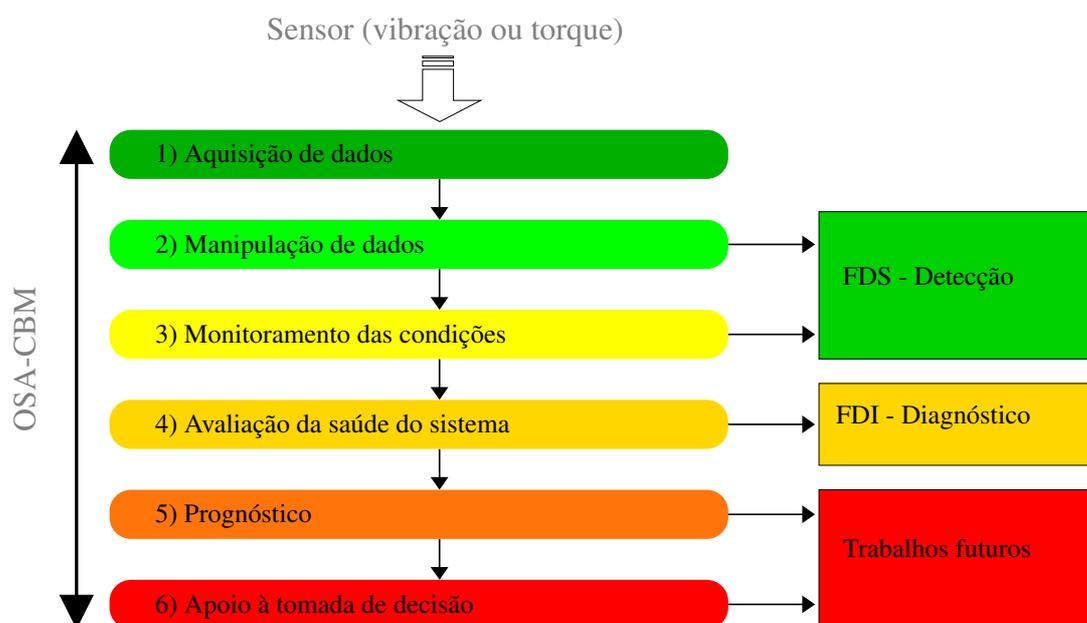
## PARTE II - METODOLOGIA



## 5 PROPOSTA E IMPLEMENTAÇÕES DO SISTEMA

A metodologia proposta apresenta conceitos baseados no modelo de arquitetura aberta para sistemas de manutenção CBM (OSA-CBM - *Open System Architecture for Condition-Based Maintenance*) (SWEARINGEN et al., 2007), de manutenção centrada em confiabilidade e técnicas de processamento de sinais reunidas num sistema inteligente de apoio à tomada de decisão. O OSA-CBM é uma implementação da especificação funcional ISO-13374 e define seis blocos de funcionalidade, ilustrados e enumerados na Figura 5.1. O sistema desenvolvido aborda os quatro primeiros blocos do modelo: 1) Aquisição de dados; 2) Manipulação de dados; 3) Monitoramento das condições ; 4) Avaliação da saúde.

Figura 5.1: Arquitetura conceitual do sistema nas camadas do OSA-CBM.



Fonte: adaptado de (JOHNSTON; WONG, 2018)

As arquiteturas para a concepção do projeto do circuito integrado dos sistemas *Fault Detection System* (FDS) (PICCOLI et al., 2015a) dos blocos 1 ao 3 e *Fault Detection Index* (FDI) (PICCOLI et al., 2015b) do bloco 4 para as tarefas de detecção e diagnóstico de falhas, bem como a comunicação com o módulo em *hardware* serão descritos nas seções a seguir. As propostas foram implementadas na linguagem *Verilog* seguindo orientações e *expertise* de Tumbush (2005) com algoritmos para concepção de DSP em *hardware*. Os testes com o estudo de caso (válvula elétrica) para validação da proposta escolhida da Figura 5.17, serão abordados no Capítulo 6.

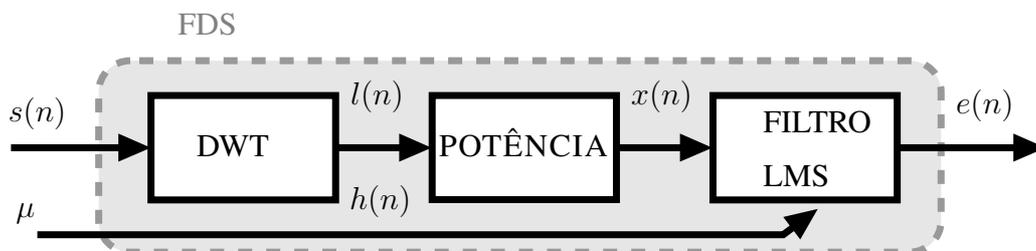
## 5.1 Sistema Embarcado FDS e FDI

A escolha de algoritmos tais como DWT (WALNUT, 2002) e Filtro Adaptativo com LMS (HAYKIN, 2001) foi relevante para o desenvolvimento do sistema em *hardware*, pois apresentam baixa complexidade computacional e bom desempenho (KONEZNY; RAO, 1995). Neste sentido, o processo de detecção de falhas com FDS (seção 5.2) compreende, na análise simultânea das propriedades do sinal em ambos os domínios de tempo e frequência, a extração de características e filtragem adaptativa. O diagnóstico das falhas com FDI (seção 5.3), através do valor de uma integral sobre a detecção ao longo de uma janela de tempo, produz um índice para identificação da falha e o estado de saúde do equipamento.

## 5.2 O Sistema FDS para Detecção e Predição de Falhas

Visando a aplicação da detecção e predição de falhas em tempo real, este trabalho propõe o uso de FDS em *hardware*. Conforme mostra a Fig. 5.2, o sistema realiza as operações de uma DWT, extração de energia do sinal e filtragem adaptativa.

Figura 5.2: Estrutura do sistema de detecção de falhas.



Fonte: (PICCOLI et al., 2015a)

Nos processos industriais, alguns fenômenos manifestam informações observáveis que podem ser caracterizados com sinais  $s(n)$  (de vibração ou torque) obtidos de transdutores. No esquema da Fig. 5.2, o bloco **DWT** é responsável pela decomposição do sinal de entrada em diversos componentes, localizados no tempo e na frequência. Para alcançar um resultado desejado, de acordo com as características do sinal<sup>1</sup>, o coeficiente de aproximação  $l(n)$  ou de detalhe  $h(n)$  é repassado ao bloco **POTÊNCIA**, onde a energia do sinal é extraída. Em seguida, um filtro adaptativo **LMS** é utilizado para predizer

<sup>1</sup>Conforme o tipo de sensor utilizado para esta técnica, o sinal de entrada pode apresentar maior sensibilidade na variação de amplitude (coeficiente de aproximação da DWT com sensor de torque) ou de frequência (coeficiente de detalhe da DWT com sensor de vibração).

os valores do sinal de entrada do filtro  $x(n)$  com a própria resposta desejada, ou seja, o sinal de entrada atrasado em um número específico de amostras. O passo de adaptação do filtro adaptativo é configurado para controlar a estabilidade e velocidade de convergência e, assim, obter a sensibilidade da variação em regime transitório no domínio tempo do sistema. É importante observar que nesta aplicação, o sinal de saída, ou seja o erro  $e(n)$ , representa a detecção das possíveis falhas nos sinais observados.

### 5.2.1 Transformada Discreta de Wavelet

As vantagens da transformada de *wavelet* para determinadas aplicações frente às convencionais, como a transformada de Fourier, já são bem conhecidas. Devido à possibilidade que oferece em obter uma representação no domínio tempo-frequência, essa transformada é amplamente utilizada para análise de sinais.

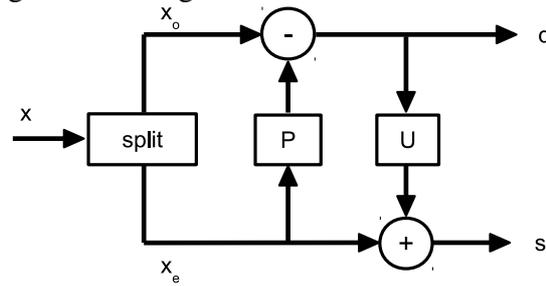
Existem dois métodos principais para sua produção e implementação, um no domínio do tempo e outro no domínio da frequência. O método baseado na frequência é denominado de *Filter Banks (FB)* e, o baseado no tempo é denominado de *Lifting Scheme (LS)*.

Na estrutura **FB**, em geral, os coeficientes do filtro são números fracionários, portanto, eles não são apropriados para a implementação em *hardware*. Além disso, o número de cálculos aritméticos no método **FB** é elevado. Portanto, neste trabalho será abordado o método **LS**.

#### Estrutura LS

Na estrutura **LS**, inicialmente as amostras do sinal de entrada são divididas em amostras pares e ímpares. A função **P** (predição da amostra ímpar) é aplicada na amostra par. A diferença entre a predição e o valor real da amostra ímpar, gera a parte do sinal de alta frequência que é denominado de coeficientes de detalhe ( $d$ ). Em seguida, é aplicada a função **U** ao sinal de detalhe e o resultado combinado com as amostras ímpares para atualizá-la de modo a obter os coeficientes de aproximação ( $a$ ) com as propriedades desejadas. Normalmente, coeficientes de aproximação contêm as mesmas propriedades do sinal de entrada ( $x$ ), mas com a metade do tamanho, ou seja, comprimido.

Figura 5.3: Diagrama de blocos da estrutura LS.



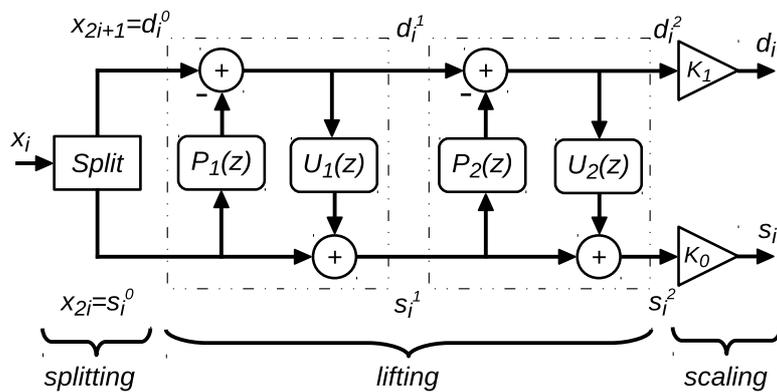
Para o bloco de predição **P** (*Prediction*) tem-se:

$$d = x_{odd} - P(x_{even}) \quad (5.1)$$

Para o bloco de atualização **U** (*Update*) tem-se:

$$s = x_{even} + U(d) \quad (5.2)$$

O número e composição dos blocos **P** e **U** na estrutura **LS** são diferentes para cada tipo de *wavelet*. A Figura 5.4 mostra uma arquitetura proposta em (JOU; SHIAU; LIU, 2001) para a *wavelet* 9/7.

Figura 5.4: Arquitetura LS em *hardware* para *wavelet* 9/7.

Fonte: (JOU; SHIAU; LIU, 2001)

A implementação em particular da DWT deste trabalho é similar à utilizada em compressão de imagem com perdas JPEG2000 (TAUBMAN; MARCELLIN, 2002) e (BARUA et al., 2005), composta por *Cohen-Daubechies-Feauveau 9/7* (CDF 9/7) (DAUBECHIES; SWELDENS, 1998). Os valores próximos das operações do JPEG2000 para predição **P** e atualização **U** adotados especialmente neste trabalho, que permitem exclusivamente a simplificação do circuito através de operações de deslocamento aritmético, são

listados a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = \alpha.(1 + z); \text{ onde } \alpha = -(2^0 + 2^{-1} + 2^{-4} + 2^{-6} + 2^{-7}) = -1,5859375 \\ U_1 = \beta.(z^{-1} + 1); \text{ onde } \beta = -(2^{-5} + 2^{-6} + 2^{-8} + 2^{-9}) = -0,052734375 \\ P_2 = \gamma.(1 + z); \text{ onde } \gamma = (2^{-1} + 2^{-2} + 2^{-3} + 2^{-7}) = 0,8828125 \\ U_2 = \delta.(z^{-1} + 1); \text{ onde } \delta = (2^{-2} + 2^{-3} + 2^{-4}) = 0,4375 \\ K_0 = K = (2^0 + 2^{-2}) = 1,25 \\ K_1 = K^{-1} = (2^{-1} + 2^{-2} + 2^{-4}) = 0,8125 \end{array} \right. \quad (5.3)$$

### 5.2.2 Energia do Sinal

Ao aplicar uma transformada com uma base ortonormal, base essa formada por vetores unitários dois a dois ortogonais, como é o caso da transformada de Walvelet, a relação de energia do sinal é mantida, dessa forma o teorema de Parseval afirma que pode-se obter essa mesma energia para sinais de tempo discretos (equação 3.4 no Capítulo 3).

Para sinais periódicos, a potência pode ser estimada em uma abordagem baseada na detecção de consumo anormal com cálculo iterativo da média móvel exponencial ponderada (EWMA - *Exponentially Weighted Moving Average*) (MARTINEZ-ORTIZ; BECK; WILDE, 2011). O algoritmo EWMA pode ser utilizado também como parte da detecção de falhas proposta por Mansouri et al. (2018).

A Equação 5.4 foi adaptada para obter o sinal de potência com o algoritmo EWMA sem a necessidade de utilizar muitos recursos de memória para a implementação da proposta em *hardware*:

$$p[k] = (1 - \lambda) \times p[k - 1] + \lambda \times u^2[k] \quad (5.4)$$

$$\lambda = \frac{2}{(N + 1)}$$

A variável  $u[k]$  é composta por frequências baixas ou altas do bloco anterior DWT, representado respectivamente, pelas variáveis de detalhe  $d[k]$  ou aproximação  $a[k]$ . O parâmetro  $\lambda$  é um fator de suavização com número  $N$  de períodos unitários. Os valores para  $\lambda$  são selecionados arbitrariamente na faixa de 0 a 1 ( $0 \geq \lambda < 1$ ), que compõe uma janela exponencialmente decrescente do sinal de entrada elevado ao quadrado  $u[k]^2$ .

O valor adotado neste trabalho para o parâmetro  $N$  foi de 7 períodos (próximo ao número de *taps* do filtro adaptativo da seção abaixo), com isso, o valor de  $\lambda$  foi de " $2^{-2} = 0.25$ " e " $(1 - \lambda)$  de " $(2^{-1} + 2^{-2}) = 0.75$ ", o que permite a simplificação do circuito com operações de deslocamento aritmético no sistema binário (base 2).

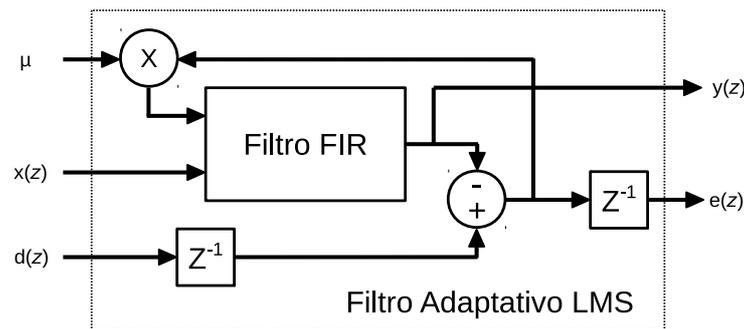
### 5.2.3 Filtro Adaptativo LMS

Quando o processo aleatório é estacionário, o filtro adaptativo pode facilmente modelar os coeficientes de modo a apresentar uma saída de erro nulo, pois as propriedades estatísticas do sinal não variam ao longo do tempo. Apesar de ser um ótimo estimador recursivo para modelos lineares estocásticos, a saída do filtro adaptativo pode apresentar sinal de erro  $e(z)$  caso o processo se transforme ligeiramente em não estacionário ou dinâmico. Esse comportamento deve-se ao fato que os sistemas dinâmicos sofrem influência não só de entradas conhecidas, como também agem sobre eles, problemas que causam efeitos e não podem ser controlados, nem modelados deterministicamente, tais como: mecanismos de falha nos equipamentos que podem causar deformações mecânicas e variações no rendimento, falha na transmissão de sinais por interferências eletromagnéticas, reverberações e ruídos de outras fontes.

Desta forma, assim como o algoritmo SANC da Figura 2.17 (Capítulo 2), proposto por Zhang et al. (2018) para cancelar ruídos, neste trabalho o filtro adaptativo foi utilizado, na tarefa de predição com o sinal de referência atrasado para determinar e adaptar-se à condição futura do processo. Deste modo, o algoritmo LMS trabalha juntamente com o filtro FIR, fazendo o ajuste dos coeficientes do filtro para minimizar o erro no sentido da média dos quadrados. Então, a velocidade de convergência pode ser ajustada, através do parâmetro  $\mu$  de passo do filtro adaptativo LMS contido no algoritmo, para obter uma boa abrangência na detecção de possíveis falhas.

A arquitetura proposta será desenvolvida a partir do diagrama do Filtro Adaptativo LMS. Esse consiste em dois blocos principais, um de Filtro FIR e outro composto do Algoritmo LMS. O diagrama de blocos representativo do Filtro Adaptativo LMS desenvolvido encontra-se na Figura 5.5. A saída  $y(z)$  é subtraída do sinal desejado  $d(z)$  para gerar o sinal de erro  $e(z)$ . Este, por sua vez, é utilizado pelo algoritmo LMS, juntamente com o parâmetro de adaptação  $\mu$ , para calcular o próximo conjunto de coeficientes a ser utilizado pelo Filtro FIR.

Figura 5.5: Diagrama de blocos do filtro adaptativo LMS.



Em algumas aplicações, as estruturas adaptativas apresentam uma grande quantidade de coeficientes para adaptação do filtro (ZHANG et al., 2018), porém seu aumento pode causar maior custo computacional do método em *hardware*. Logo, foi adotado neste trabalho a dimensão do *tap* (número de atrasadores) do filtro FIR na ordem de 5. Esse valor está relacionado com a quantidade de coeficientes do filtro e com sua função de transferência idealmente finita aplicada ao sinal de entrada (sinal de sensores acoplados a um sistema mecânico ideal de quinta ordem).

### 5.3 O Sistema FDI para Diagnóstico de Falhas

O índice de detecção de falhas ou *Fault Detection Index* (FDI) (PICCOLI et al., 2015b) obtém uma informação probabilística e compactada do tipo de falha detectada no bloco FDS para determinar, de uma forma diferenciada, a grandeza das amostras de falha a serem analisadas dentro de uma janela de tempo durante o teste. Os cálculos são realizados dentro do período de amostragem, obtendo-se assim o risco potencial e as causas da falha em tempo real. Deste modo, a degradação do equipamento e o tipo de falha podem ser monitorados constantemente pela probabilidade de sua ocorrência, e sua severidade, pelo índice que corresponde à gravidade do efeito da falha.

#### 5.3.1 Índice de Detecção de Falhas

A amplitude do sinal do resultado do bloco anterior FDS (entre 0 e 1) é comparado com um limite pré-configurado (0,25 ou  $\frac{2^9}{2^{11}}$  neste caso, descartando os 9 *bits* menos significativos do sinal de erro) no bloco FDI, de forma que um *flag* indique uma detecção ( $F^D$  - *Fault Detection*). O FDI soma o número de detecções em um dado conjunto de amostras (*frame*) de tamanho N (256 neste trabalho). Como a saída do FDI também

é um sinal compactado em  $N$  vezes a taxa de dados do sinal FDS, pode ser mais facilmente analisado ou até mesmo transmitido por redes sem fio (por exemplo, protocolo WirelessHART™), economizando energia e banda de transmissão de dados. O sistema obedece à Equação 5.5 abaixo:

$$FDI[j] = \sum_{k=N \times j}^{N \times (j+1) - 1} FD[k] \quad (5.5)$$

Onde  $FD[k]$  é uma *flag* de índice  $[k]$  que indica se uma falha é detectada (quando o sinal de erro excede um determinado limiar) em cada amostra na saída do FDS, o índice  $[k]$  refere-se a um instante atual de tempo discreto,  $N$  é o número de medidas discretas e  $[j]$  é a amostra de tamanho  $N$ .

## 5.4 Chip para Predição e Detecção de Falhas

A arquitetura conceitual é responsável pelo processamento das quatro primeiras camadas do modelo OSA-CBM, ou seja, captura de dados e processamento inteligente (que inclui processamento de sinais, monitoração de condição e diagnóstico). Divide-se o sistema em duas aplicações claramente diferenciadas: a aplicação de detecção de falhas com FDS e a aplicação de diagnóstico com FDI. Para formar sensores inteligentes, visto na seção 2.2.2, tais aplicações podem ser conectadas entre si em conjunto com um conversor de dados A/D. Nas subseções, a seguir, foram abordadas as arquiteturas para implementação em *hardware*: O sistema FDS e FDI; O sistema FDS e FDI com um módulo de conversão A/D e o protocolo de comunicação SPI; O sistema FDS com o protocolo de comunicação SPI; O sistema FDS com FDI e protocolo de comunicação SPI, que posteriormente, será apresentado em detalhes.

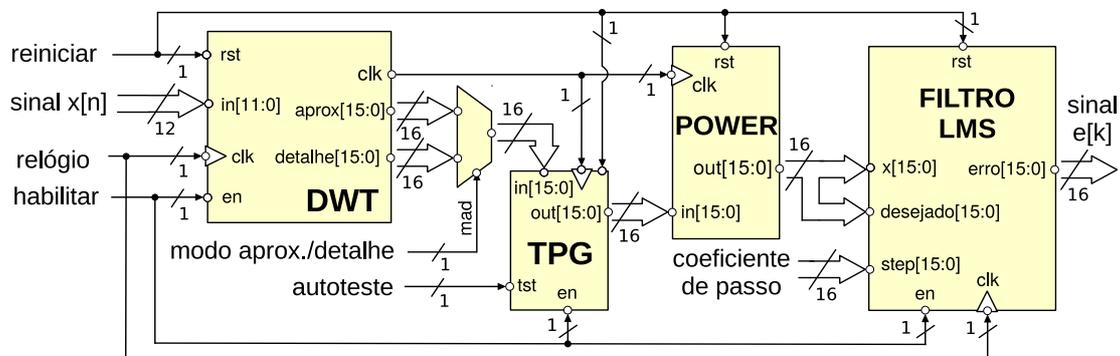
### 5.4.1 Arquitetura do FDS

Dependendo do resultado desejado e do tipo de sinal, o sistema permite que o usuário escolha o uso dos coeficientes de aproximação (amplitude do sinal da leitura de torque) ou os coeficientes de detalhe (frequências do sinal da leitura de vibração) da **DWT** para serem enviados ao bloco de **POTÊNCIA**, no qual a energia do sinal é calculada. Caso o bloco gerador de padrões de teste (**TPG** - *Test Pattern Generation*) seja

selecionado, o sinal a ser processado será substituído por uma sequência pseudoaleatória.

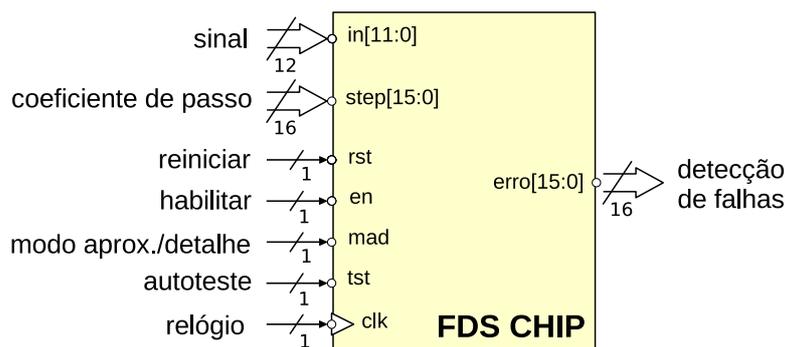
O esquema do FDS sintetizado aplicado ao estudo de caso é apresentado na Figura 5.6. Contém um pino de relógio (`clk`), um pino de modo aproximação ou detalhe (`mad`), um pino de reiniciar (`rst`), um pino para realizar autoteste (`tst`), um pino para habilitar o chip e sua máquina de estados (`en`), doze pinos de entrada de sinal (`in[11:0]`), dezesseis pinos para o parâmetro  $\mu$  (`step[15:0]`), que é o passo de adaptação do filtro **LMS**; e finalmente o sinal de detecção de saída (`erro[15:0]`). Conforme a Figura 5.7, este esquema necessita de 49 pinos de função e dois de alimentação totalizando 51 pinos.

Figura 5.6: Arquitetura do FDS para síntese.



A imagem de topo com os sinais de entrada e saída do FDS encontra-se na Figura 5.7.

Figura 5.7: Diagrama da pinagem do FDS.

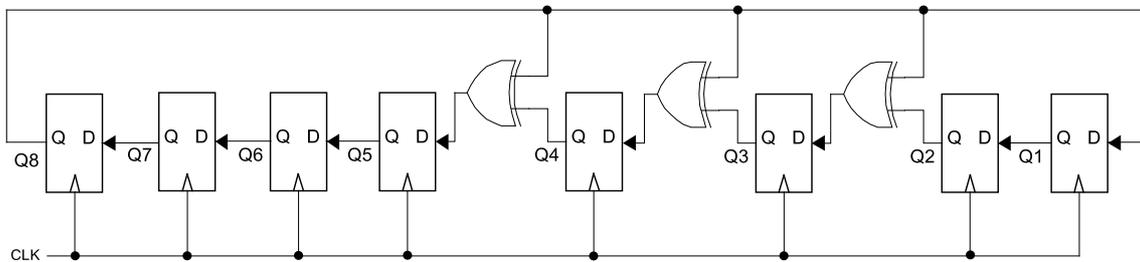


#### 5.4.2 Arquitetura para Autoteste Funcional

Embutido na arquitetura do chip, foi utilizado um gerador de estímulos (vetores de teste) usando registradores de deslocamento com realimentação (LFSR - *Linear Feedback Shift Register*), conforme Figura 5.8, com o polinômio primitivo característico

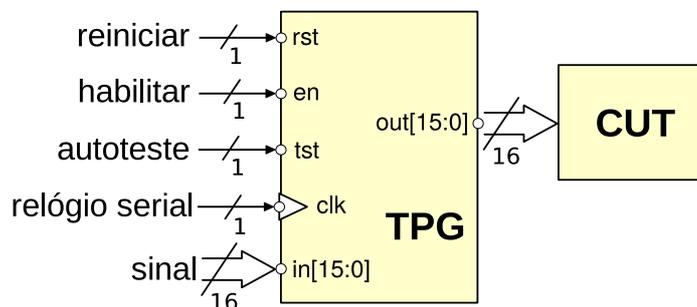
$f(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ , que é ativado na condição de autoteste do circuito emulando uma sequência de sinal pseudoaleatória, obtendo-se assim um ruído como sinal de entrada. O LFSR da Figura 5.8 é de configuração Galois (KHAN, 2013), que permite um melhor desempenho em termos de velocidade, combinado com a técnica de *clock gating* na implementação de *hardware*, permite também menor consumo de energia. O LFSR atua como um contador de 8 *bits*, possui registradores de deslocamento e realimentação linear que utiliza 8 *flip-flops* e, quando uma função primitiva é configurada, pode implementar 255 ( $2^8 - 1$ ) estados (menos o zero) sem repetições destes (BEZERRA; VARGAS; GOUGH, 2001).

Figura 5.8: Implementação na configuração Galois de 8-bit do LFSR.



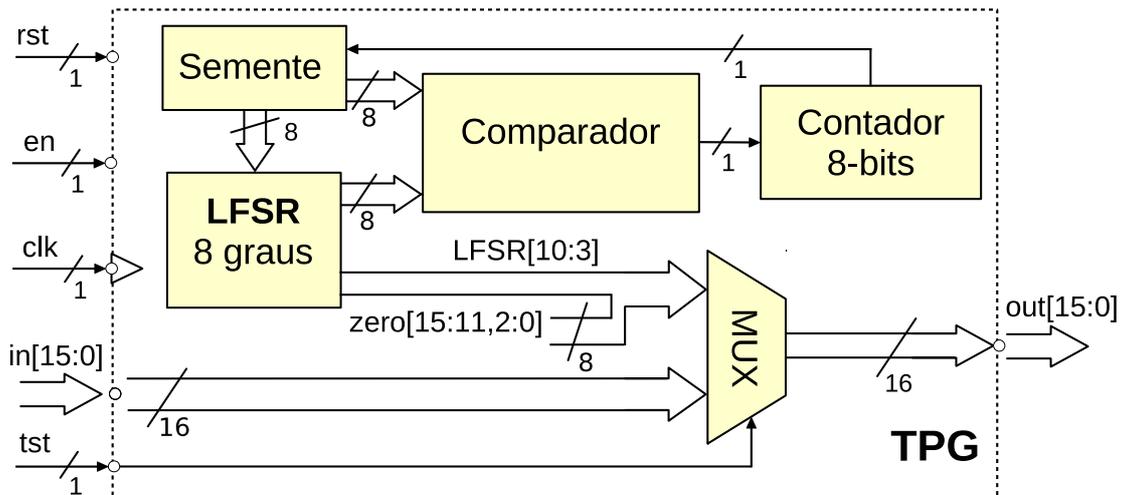
A Figura 5.9 exibe a arquitetura do gerador de padrões de teste (TPG - *Test Pattern Generation*) para o circuito sobre teste (CUT - *Circuit Under Test*), que por sua vez, é composto pelos blocos do chip, entre eles o FDS, FDI e SPI.

Figura 5.9: Gerador de padrões de teste para o chip.



O autoteste funcional do chip é realizado conforme o esquemático da Figura 5.10. Inicialmente o chip deve estar habilitado (pino EN), ter um sinal de relógio (pino CLK) e o autoteste ser selecionado (pino TST). O teste pode ser reinicializado pela opção de reiniciar o chip (pino RST).

Figura 5.10: Esquema de funcionamento do gerador de padrões de teste.

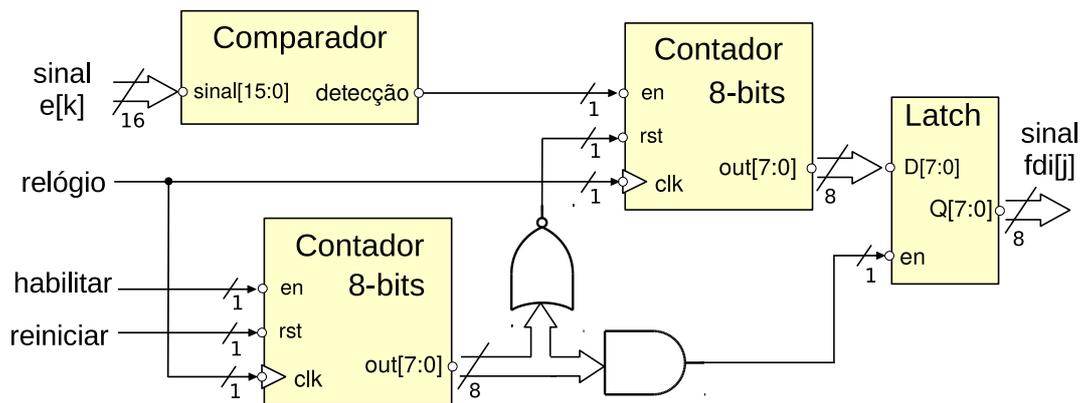


Sempre que o autoteste for inicializado, o algoritmo LFSR receberá um valor inicial denominado de semente. Conforme o andamento dos pulsos de relógio, vetores pseudoaleatórios do LFSR são gerados até coincidir com o valor da semente. Então, o comparador ativa o contador de 8 bits para incrementar um valor até que chegue no limite de 256 ( $2^8$ ), neste momento, a semente é zerada para que não haja mais a geração dos vetores pseudoaleatórios. Deste modo, a sequência de teste é encerrada com dados que permitem a produção de um gráfico ou histograma, onde visualmente o padrão de teste pode ser verificado.

### 5.4.3 Arquitetura do FDI

O sistema FDI foi elaborado para ser acoplado ao FDS e ampliar sua capacidade. Em sua estrutura, contém dois contadores e um comparador, onde um contador determina o número de amostras, enquanto o outro realiza a contagem do número de detecções. O circuito sintetizável é apresentado na Figura 5.11. Seu funcionamento é similar ao trabalho de Shahbazi, Poure e Saadate (2018). Note que a variável de detecção de erro  $\varepsilon_{k0}$  da Figura 2.21 (Capítulo 2), neste trabalho é denominado FD. É realizada uma comparação com um limiar no bloco " $> h$ ", e o mesmo ocorre com o bloco comparador na implementação da Figura 5.11. A variável N é utilizada nos dois trabalhos da mesma forma para realizar contagem de detecções, só que em (SHAHBAZI; POURE; SAADATE, 2018), é utilizado também para sincronizar e reconfigurar o processo, já que o sistema foi montado em malha fechada.

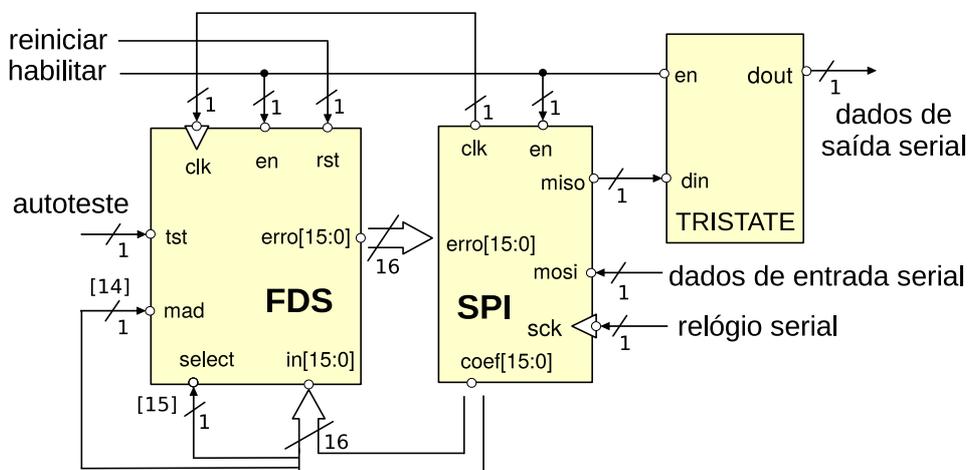
Figura 5.11: Arquitetura do FDI para síntese.



#### 5.4.4 Arquitetura do FDS com SPI

Uma vez que o escopo deste trabalho é a parte digital do sistema, o módulo A/D foi removido, assim a compilação e síntese do código fica limitada somente à parte digital. A Figura 5.12 é apresentada a arquitetura com FDS e SPI sintetizada.

Figura 5.12: Arquitetura do chip FDS para predição de falhas com SPI.



O diagrama da pinagem do chip é apresentado na Figura 5.16 e uma lista dos sinais de entrada e saída na Tabela Tabela 5.1. Com esta nova estrutura, a pinagem do chip ficou reduzida, apresentando seis pinos de função e dois de alimentação. O SPI escravo desenvolvido utiliza 16 *bits* para transmissão, compatível com um SPI mestre comercial que opere com 8 *bits* de transmissão. Conforme o protocolo de comunicação do chip (seção 5.6.1), o relógio do chip é alimentado pela própria interface SPI e os 16 *bits* recebidos serialmente representam o sinal ou coeficiente de adaptação do filtro LMS mais a opção de seleção de coeficientes de aproximação ou detalhe da DWT. Os 16 *bits*

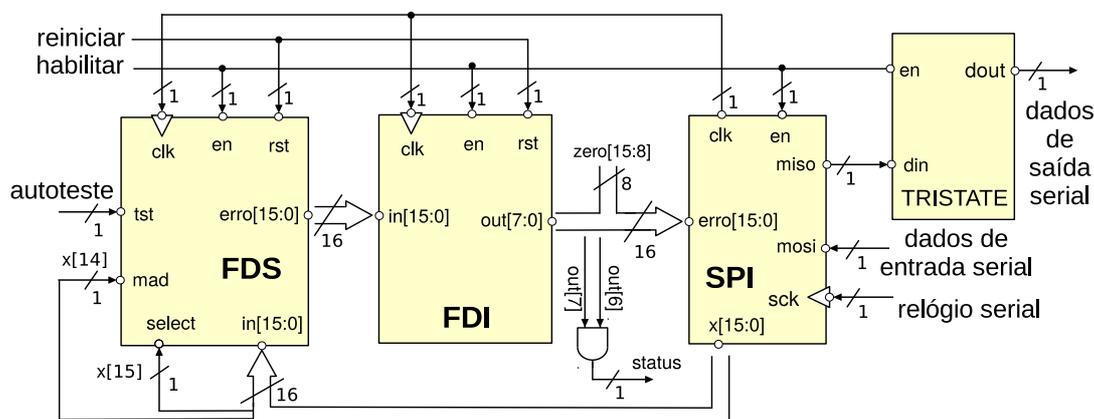
enviados serialmente no modo *full duplex*, representam a detecção de falhas do chip.

### 5.4.5 Arquitetura do FDS e FDI com SPI

A arquitetura para o sistema FDI (seção 5.3) contém dois contadores e um comparador, um contador determina o número de amostras, enquanto o outro realiza a contagem do número de detecções.

O FDI foi integrado e sintetizada ao FDS com o módulo SPI (seção 5.4.4) e é apresentado na Figura 5.13:

Figura 5.13: Arquitetura do chip FDS e FDI para predição de falhas com SPI.



Esta estrutura apresenta a mesma pinagem do chip anterior e o mesmo diagrama da Figura 5.16. Adicionalmente para este esquemático com FDI, foi incluído um pino STS de *status*, que é ativado sempre que seu valor for superior ou igual a 75% ( $\frac{(2^7+2^6)}{2^8}$ ). A Tabela Tabela 5.1 apresenta a lista dos sinais de entrada e saída.

## 5.5 Arquitetura para Indústria 4.0

O monitoramento do funcionamento de equipamentos, através do chip de predição de falhas, permite identificar problemas antes que se tornem graves, possibilitando uma maior eficiência na linha de produção. Evita-se, dessa maneira, perdas financeiras em futuras fábricas que estejam diretamente ligados à coleta e análise de grande volume de dados sempre que seja utilizado o paradigma da Internet das coisas industrial (IIoT - *Industrial Internet of Things*) (BOYES et al., 2018) e Indústria 4.0 (HOFMANN; RÜSCH,

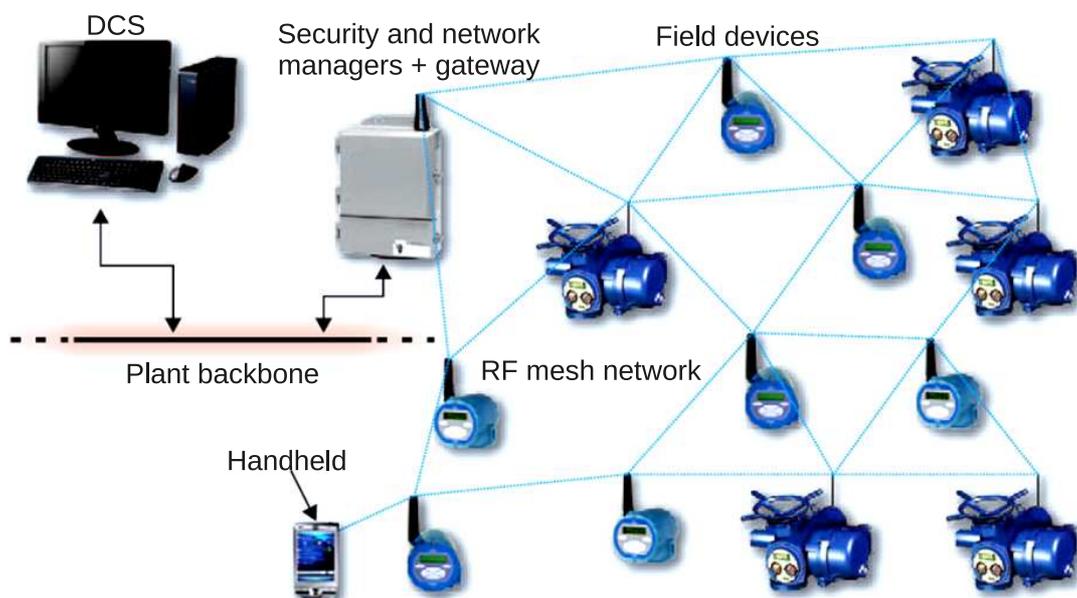
2017), por exemplo.

Diferentes dispositivos podem comunicar-se com um único microcontrolador através do protocolo SPI (seção 6.3), pois sempre haverá um mestre (um microcontrolador) e um ou mais escravos (nesse caso, FPGAs ou chips para predição e detecção de falhas). Deste modo, pode-se implementar no microcontrolador protocolos seguros de rede tais como Modbus, WirelessHart™, entre outros, que, por sua vez, possuem também ferramentas de diagnóstico.

O escravo poderá operar em baixa frequência pelo ajuste do relógio da comunicação serial, uma vez que, para a transmissão WirelessHart™, os dados de detecção de falhas podem ser enviados com uma taxa máxima de  $250 \text{ kbit/s}$ . Já em uma rede para comunicação a longas distâncias e com consumo baixo de energia (LoRa - *Long Range*) (MIKHAYLOV; PETAEJAEJAERVI; HAENNINEN, 2016), por exemplo, a taxa máxima de transmissão é de  $50 \text{ kbit/s}$ .

A estrutura geral de uma rede WirelessHART™ com dispositivos de detecção de falha foi abordada por Piccoli et al. (2013b) e pode ser visualizada na Figura 5.14. Nela, é possível identificar os elementos fundamentais além do *handheld* (com ou sem fio, para comissionamento e inspeção) e da ligação com o barramento de dados da planta. Nesta Figura, o gerenciador de rede, o *gateway* (que possibilita a comunicação entre a aplicação *host* da planta e os dispositivos de campo) e o ponto de acesso estão contidos em um único equipamento, o que tem sido utilizado comercialmente.

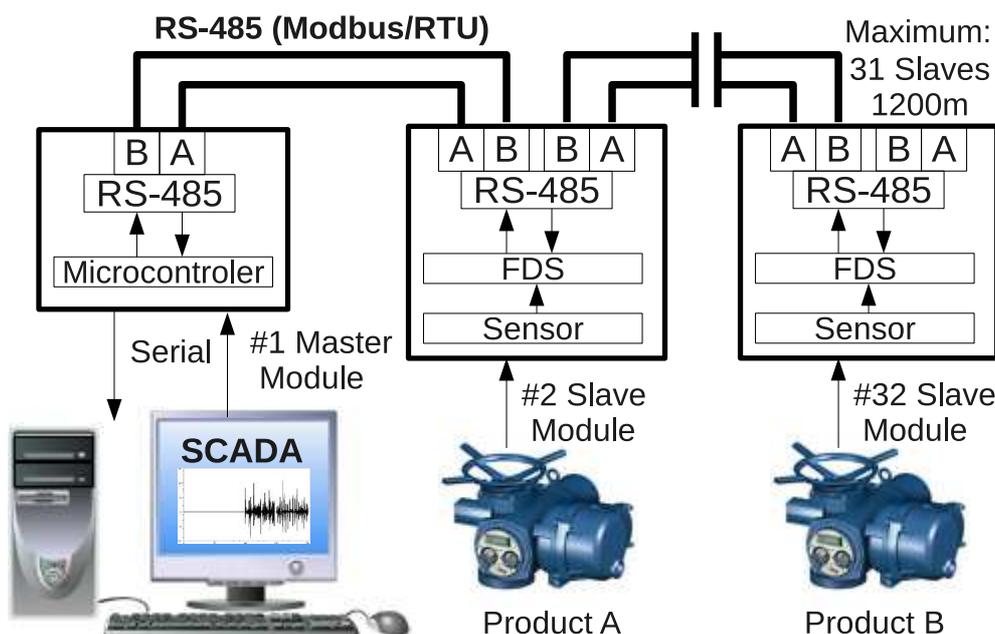
Figura 5.14: A estrutura geral com uma rede WirelessHART™.



Fonte: (PICCOLI et al., 2013b).

A rede de comunicação da Figura 5.15 com protocolo de linha serial *Modbus RTU* (*Remote Terminal Unit*) foi proposta por Piccoli et al. (2013a), que utilizaram um gestor de rede, ou mestre, responsável por iniciar a transmissão. O dispositivo para detecção de falhas, denominado de escravo, ficou disponível para consulta e respondeu às requisições do mestre. Nesse protocolo, somente um mestre por vez pode ser conectado ao barramento, enquanto que até 247 nós escravos podem ser ligados a este barramento.

Figura 5.15: Configuração do projeto em rede *Modbus*.



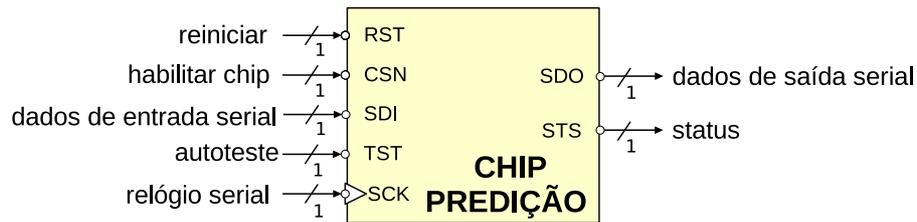
Fonte: (PICCOLI et al., 2013a).

Os protótipos dos módulos mestre/escravo deste sistema, são compostos por microcontroladores e redes de comunicação que utilizam circuitos integrados, transceptores para converter os sinais nos padrões RS-485 como meio físico de transmissão. O protocolo *Modbus RTU* foi implementado em *software* e embarcado nos microcontroladores. O sistema teve um nó mestre que emitiu comandos para um ou mais nós escravos com sistema de detecção e predição de falhas, que por sua vez processaram as respostas.

## 5.6 Descrição Operacional do Chip

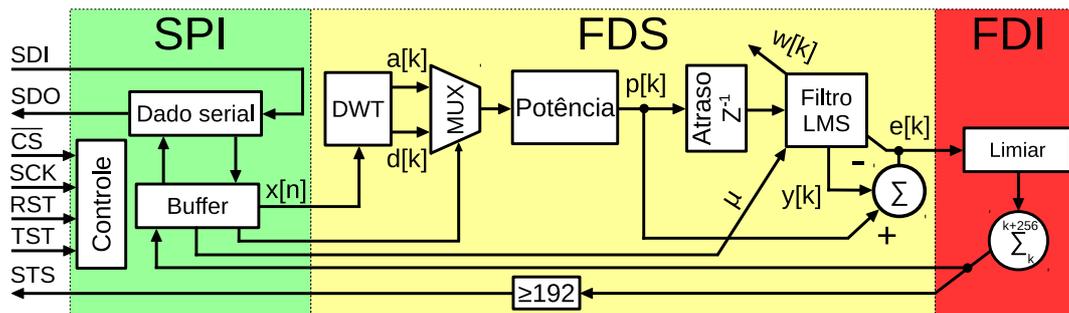
A imagem de topo com os sinais de entrada e saída do FDS da Figura 5.7 (seção 5.4.1) com ou sem acoplamento do FDI (seção 5.4.3) e a interface de comunicação SPI, fica reduzida a função de sete pinos como mostra a Figura 5.16.

Figura 5.16: Chip para predição de falhas com interface SPI.



O esquemático da Figura 5.17 apresenta o diagrama de blocos internos do chip. Ele contém uma interface de comunicação serial através do protocolo SPI, que realiza uma conversão serial/paralelo dos dados de entrada e saída, e é estimulado pelo gerador de relógio serial do dispositivo mestre, conectado ao barramento. Possui ainda a opção de habilitar ou não o chip, reiniciá-lo e colocá-lo no estado de teste.

Figura 5.17: Esquemático do chip para predição de falhas com interface SPI.



A comunicação do chip via SPI com um mestre, visto na seção 3.4, contém as principais conexões para a arquitetura proposta. A Tabela 5.1 lista e descreve os sinais de entrada e saída (E/S) do chip.

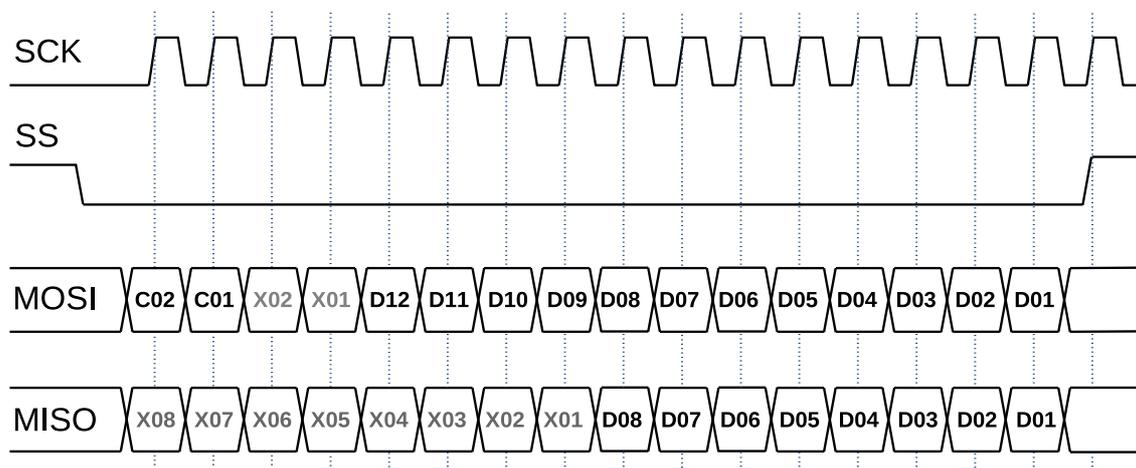
Tabela 5.1: Pinagem do chip com interface SPI.

Nome	E/S	Bits	Ativo	Descrição
RST	E	1	Alto	Zera a memória e todos os sinais
SDI	E	1	-	Dados de entrada Serial
SDO	S	1	-	Dados de saída Serial
SCK	E	1	-	Relógio Serial para o SPI
TST	E	1	-	Autoteste funcional do chip
STS	S	1	-	<i>Status</i>
CSN	E	1	Baixo	Inicialização ou seleção do chip
Total		7 pinos de função e 2 de alimentação ( $V_{DD}$ e $V_{SS}$ )		

### 5.6.1 Protocolo de Comunicação SPI para o Chip

Por padrão a comunicação SPI permite a configuração das bordas de comunicação do relógio SCK através de sua polaridade (CPOL - *Clock Polarity*) e fase (CPHA - *Clock Phase*). A configuração estabelecida no dispositivo embarcado foi 0 (zero) para ambos CPOL e CPHA, com borda de troca na subida, ocorrendo a transição no meio do *bit*. A posição do *bit* mais significativo (MSB - *Most Significant Bit*) foi estabelecida como o primeiro *bit* da comunicação. É possível observar na Figura 5.18 todas essas características pelo traçado vertical entre a borda de subida do relógio e a sequencia de dados transmitidos (MISO) e/ou recebidos (MOSI).

Figura 5.18: Protocolo de comunicação com o chip.



O chip comunica-se através do protocolo SPI com microcontroladores através de 14 *bits* de dados e 2 *bits* de controle, enviando para o microcontrolador 16 *bits* de dados correspondente ao sinal de detecção de falhas:

1. O *bit* **C02** (em binário a posição [15]) do MOSI é utilizado para identificar os dados de entrada. Caso o valor seja “1”, os dados representam o sinal adquirido do sensor. Quando “0”, os dados equivalem ao número do coeficiente de ajuste do filtro adaptativo;
2. O *bit* **C01** (em binário a posição [14]) do MOSI é reservado para a seleção entre os coeficientes de aproximação ou de detalhe da transformada DWT;
3. Os *bits* **X01** e **X02** do MOSI e **X01** a **X08** do MISO são reservados para algum outro uso;

4. Os *bits* **D01** a **D12** do MOSI representam o sinal ou coeficiente, dependendo de **C02**. Estes números devem estar anotados em ponto fixo no formato  $Q5.11$  ( $Q_{m.n}$ :  $m$  é a parte inteira e  $n$  a fracionária, ver seção 3.3.1).
5. Os *bits* **D01** a **D08** do MISO representam números inteiros de detecção do bloco FDI.

### 5.6.2 Ajuste dos Parâmetros do Chip

Uma análise sobre o algoritmo FDS e FDI apresentado neste trabalho, revela que o processamento dos sinais no chip é limitado com uma certa quantidade de *bits*. Portanto, para evitar saturação ou estouro da capacidade de armazenamento de um registrador e evitar perda de precisão dos cálculos no chip, é necessário, principalmente, o ajuste de um valor razoável de ganho do sinal do sensor de entrada.

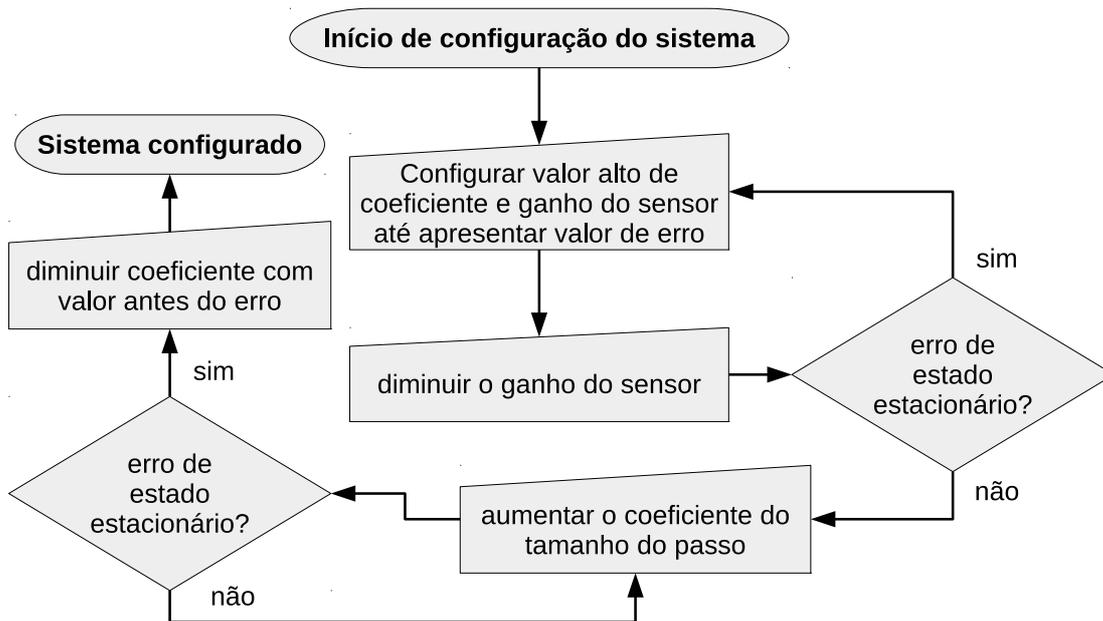
Levando em conta que os dados de entrada do circuito são representados em um número limitado de *bits*, na representação de ponto fixo do sinal, o peso do *bit* mais significativo deve ser fixado de acordo com a dinâmica do valor do sinal do sensor. A otimização no formato  $Q$ , do peso do *bit* menos significativo, é realizado através do truncamento do tamanho ou comprimento da palavra, assim pode-se manter uma certa precisão dos cálculos no chip e diminuir sua complexidade em nível de *hardware*.

O procedimento para configuração do chip (ou treinamento do sistema de detecção de falhas) da Figura 5.19, deve ocorrer durante a condição de operação normal do equipamento, ou seja, com o sistema funcionando sem falha. Inicialmente, é necessário adquirir os dados do sensor e quantificá-los no formato de ponto fixo, durante a operação normal do sistema monitorado.

A seguir o chip deve apresentar um valor de erro estacionário, para isso, o ganho do sensor é ajustado em um valor mais alto e o parâmetro de adaptação do filtro adaptativo LMS em um valor mais baixo. Feito isso, o valor do ganho do sinal de entrada é diminuído até que o erro de estado estacionário seja nulo.

Então, o valor do passo de adaptação do filtro deve ser aumentado até aparecer o erro novamente. Em seguida, o valor do último ajuste do parâmetro, enquanto o chip não indicava sinal de erro, deve ser configurado no chip.

Figura 5.19: Procedimento para configuração do chip.



O usuário pode realizar a configuração do chip, enviando os parâmetros via conexão SPI. Os comandos inseridos no protocolo para ativar o modo de configuração do chip, são apresentados na seção 5.6.1. Uma vez que a comunicação é estabelecida entre o chip e o microcontrolador (seção 6.3) o chip processa os dados recebidos do microcontrolador, analisa e devolve via conexão SPI em tempo real. A visualização dos resultados é realizada pelo usuário em um histograma no computador.

### PARTE III - RESULTADOS E CONCLUSÕES



## 6 RESULTADOS OBTIDOS

A linguagem *Verilog* suporta vários níveis de abstração e estilos de descrição estrutural, comportamental e de fluxo de dados. Todas essas formas são simuláveis, porém nem toda abstração tem representação válida sintetizável para uma *netlist* final na biblioteca de fabricação escolhida. O projeto deste trabalho levou em conta este fator, com a maior parte da descrição em nível estrutural, poucas implementações em nível comportamental e 0% utilizando outras descrições de *hardware* (esquemáticos e blocos de propriedade intelectual ou de terceiros).

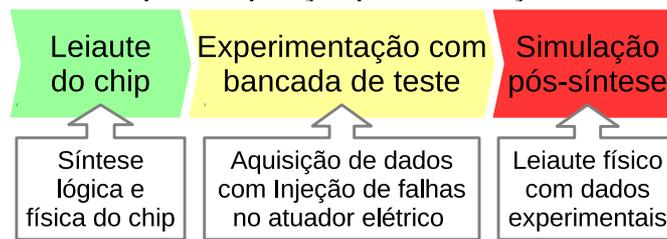
Para a elaboração do leiaute de um circuito integrado de aplicação específica (ASIC), O projeto foi particionado em módulos e sub-módulos hierárquicos baseados na funcionalidade de cada bloco do sistema. Foram criados blocos para a DWT, EWMA, TPG (com LFSR), Filtro LMS, FDI e SPI de modo que as lógicas com características similares foram agrupadas e conectadas para melhorar a qualidade da síntese. A hierarquia do projeto e o modo com que este é particionado podem influenciar no resultado da síntese, então, quantas vezes foram necessárias, toda essa descrição depois de simulada foi sintetizada, otimizada e simulada novamente.

A síntese lógica do projeto foi realizada com as ferramentas das empresas Synopsys (para a biblioteca de 90 nm) e Cadence (para a biblioteca de 0,6 μm), a seguir, foi projetada a árvore de distribuição do sinal de relógio do circuito. De posse da descrição *netlist* do circuito desenvolvido, foi realizada a simulação deste, utilizando a ferramenta *Verilog Compiler and Simulator* (VCS) da Synopsys e *vsim* da Mentor Graphics a fim de verificar as atividades de chaveamento do circuito.

Visando a elaboração de um leiaute para a solução proposta em ASIC, será apresentada também, sua implementação utilizando a tecnologia FPGA de *hardware* programável em conjunto com um microcontrolador. O microcontrolador realizou a conversão dos valores entre os formatos de ponto fixo e ponto flutuante, e serviu como uma ponte de comunicação entre a FPGA e a estação de trabalho do usuário, neste caso um computador, mas poderia ser também outro equipamento ou *hardware* específico.

Conforme a Figura 6.2, a síntese física do chip foi realizada na etapa de leiaute, utilizando as ferramentas de síntese das empresas mencionadas anteriormente e analisadas as estimativas de tempo, área e consumo de energia do circuito. Ao final dessa etapa, o leiaute com a descrição física do circuito foi validado mediante testes com as ferramentas existentes para que ele possa ser fabricado.

Figura 6.1: Etapas de operação para a obtenção de resultados.



Na etapa de experimentação com bancada de teste, os dados de operação do atuador elétrico foram coletados em condições normais e de falha. Finalmente, a simulação pós-síntese do leiaute físico foi realizada com dados do estudo de caso obtidos na etapa anterior em conjunto com um *testbench*. De posse dos resultados dessa etapa, os gráficos para análise foram gerados na ferramenta *Scilab*.

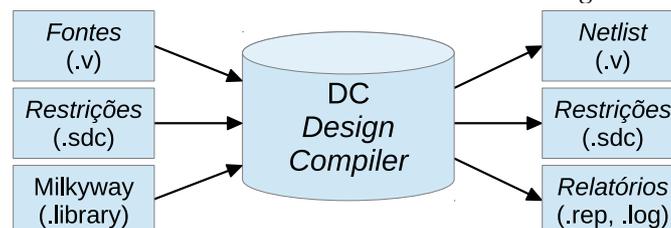
## 6.1 Desenvolvimento do Chip na Biblioteca Educacional de 90 nm

No desenvolvimento do chip na biblioteca educacional de 90 nm desta pesquisa, foram utilizadas duas ferramentas de *software* da Synopsys de síntese, chamadas de *Design Compiler* (DC) e *Integrated Circuit Compiler* (IC).

### 6.1.1 Síntese Lógica do Chip

A ferramenta *Design Compiler* (DC) foi utilizada na síntese lógica. A Figura 6.2 mostra os dados de entrada e saída utilizados nessa síntese. Dentre os arquivos de entrada podem ser citados: a biblioteca da synopsys *SAED 90 nm* (extensão *.library*); Arquivos fontes em *Verilog* (*.v*); Arquivo de restrições (*.sdc*). A ferramenta DC foi utilizada para otimizar o circuito, analisar problemas da arquitetura e gravar os resultados nos formatos de saída (*.v*, *.sdc*, *.rep*).

Figura 6.2: Entradas e saídas da ferramenta *Design Compiler*.

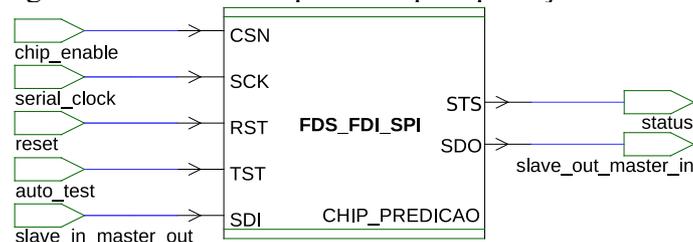


Foi habilitada a opção para a técnica de *clock gating* da ferramenta DC com a di-

retiva *insert\_clock\_gating*. Deste modo, um sinal de controle que é repassado ao banco de registradores e implementado automaticamente à lógica de distribuição do sinal de relógio. Já o processo de otimização da área do projeto foi realizado com a opção *compile\_ultra* e diretiva para esforço máximo *area\_effort\_high\_script*. Assim, pode-se reduzir a dissipação de energia e a área do projeto (reduzindo à lógica combinacional), o que permite aumentar a frequência máxima de operação do circuito.

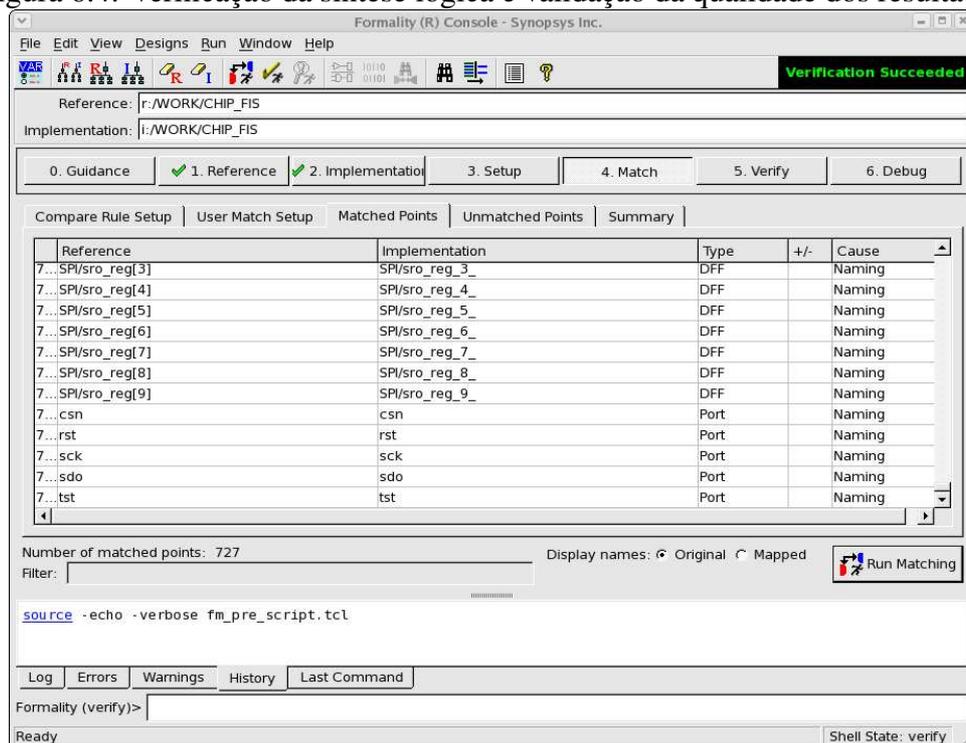
A Figura 6.3 ilustra a visão de topo do chip gerado pela ferramenta DC.

Figura 6.3: Visão de topo do chip de predição de falhas.



A ferramenta Formality da Synopsys da Figura 6.4 foi utilizada para validação e verificação de equivalência *frontend* (entre RTL e *netlist* gerados), obtendo assim uma correlação precisa da qualidade dos resultados (QoR - *Quality of Results*) antes e após a síntese lógica: temporização, área e potência utilizada. As palavras (*Verification Succeeded*) indicam que a verificação dos requisitos de tempo foi bem sucedida e ambos os projetos são equivalentes.

Figura 6.4: Verificação da síntese lógica e validação da qualidade dos resultados.

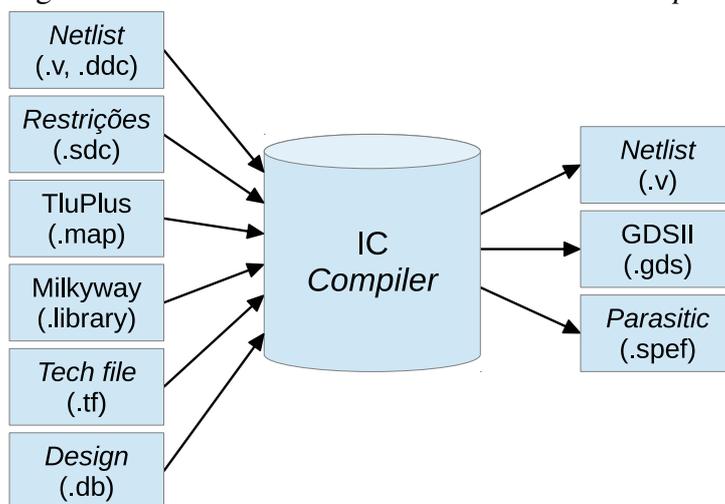


### 6.1.2 Síntese Física do Chip

A ferramenta *Integrated Circuit Compiler* (IC) foi utilizada na síntese física. A Figura 6.5 mostra os dados de entrada e saída utilizados nessa síntese. Dentre os arquivos de entrada pode-se citar: a biblioteca da Synopsys *SAED 90 nm* (extensão `.library`); Arquivos *netlist* (`.ddc`); Arquivo de restrições (`.sdc`); Informação parasitas dos componentes (`.map`); Informações específicas da tecnologia, tais como os nomes, características (físicas e elétricas) para cada camada de metal (`.tf`); Informações de energia, célula lógica, tempo (`.db`).

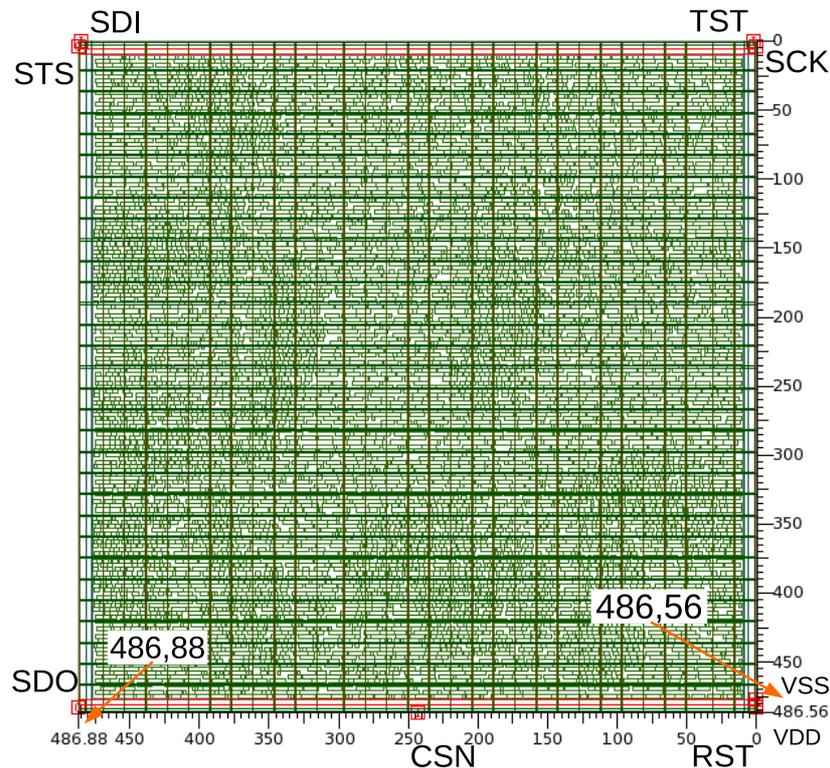
Essa ferramenta foi utilizada para elaboração do leiaute e preparar os dados seguindo todas as etapas de fluxo de projeto: *Floorplanning*, *Power Planning*, *Placement*, *Clock Tree Distribution*, *Routing*, *Physical Verification* e gravar os resultados em formato de arquivo com a descrição do circuito integrado (`.v`, `.gds`, `.spef`), usado pelas *foundries* como referência para sua fabricação.

Figura 6.5: Entradas e saídas da ferramenta *IC Compiler*.



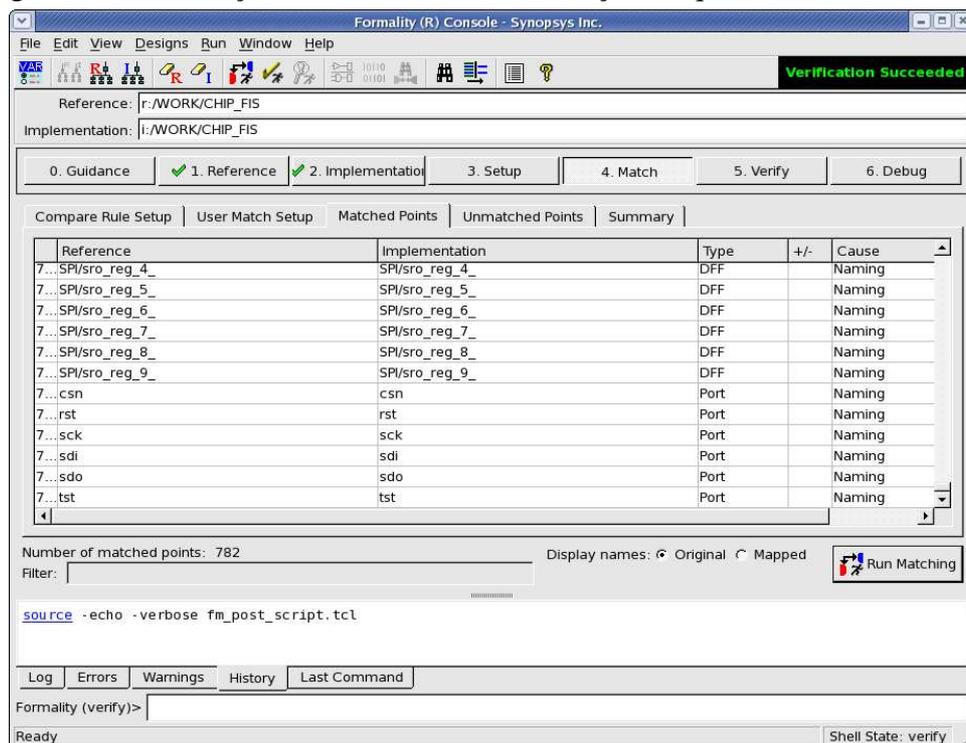
O processo de síntese física da Figura 6.6, otimizado para atender às especificações exigidas, consiste em 9 camadas de metal nas quais as camadas metálicas ímpares são usadas somente para conexões horizontais e as pares somente para conexões verticais. A camada de metal 1 foi usada para posicionar células padrão; A camada de metal 2 foi usada para relógio vertical e roteamento de sinal; A camada de metal 3 foi usada para relógio horizontal e roteamento de sinal; Da camada de metal 4 até a camada de metal 9 foram usadas principalmente para trilhas de energia e aterramento; Parte do roteamento do sinal também foi utilizado entre as camadas de metal 4 e 7 para evitar erros na verificação de regras de projeto (DRC - *Design Rule Checking*).

Figura 6.6: Síntese física do chip de predição de falhas em 90 nm.



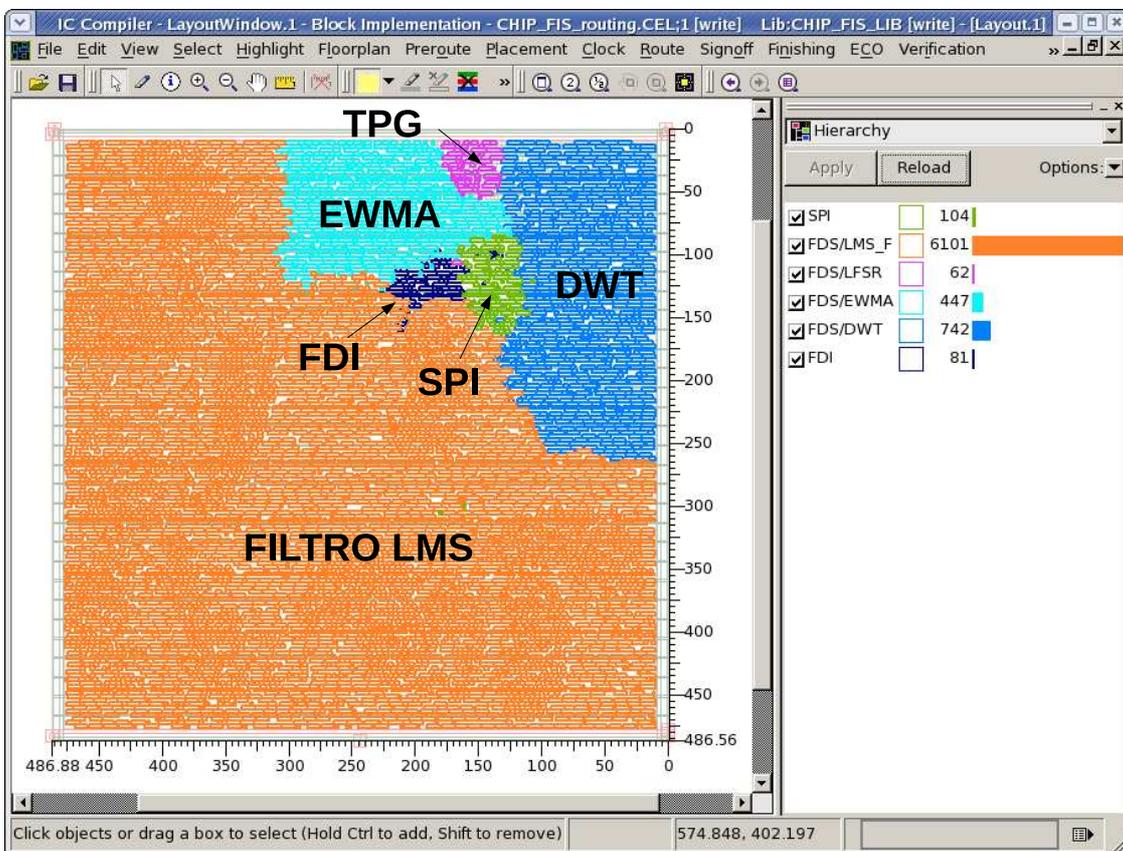
A ferramenta Formality da Synopsys da Figura 6.7, também foi utilizada no fluxo de projeto para validação e verificação de equivalência *backend* (entre *netlist* e leiaute gerados). As palavras (*Verification Succeeded*) indicam que a verificação dos requisitos de tempo foi bem sucedida e ambos os projetos são equivalentes.

Figura 6.7: Verificação da síntese física e validação da qualidade dos resultados.



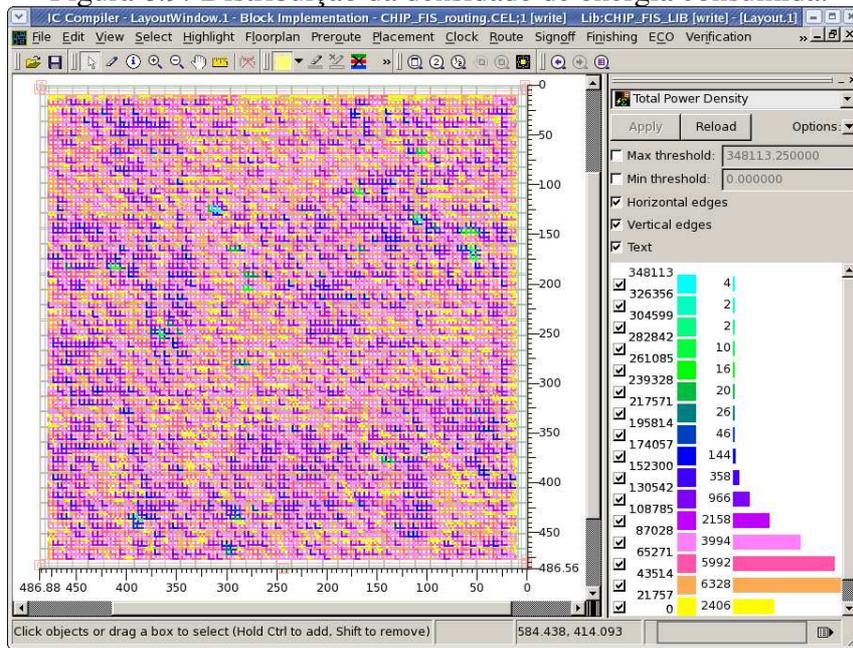
A Figura 6.8 abaixo, ilustra o modo de visualização de posição dos blocos do sistema, após a conclusão da síntese física com a ferramenta IC. As barras coloridas desta ferramenta são histogramas e indicam a proporção de células padrão utilizadas para cada bloco do projeto. Pode-se observar, a partir dessa ilustração, que a maior parte da área ocupada no chip é devido ao bloco do filtro adaptativo LMS com 6101 do total de 7596 células padrão, totalizando 80,32% de ocupação. Já o bloco TPG para autoteste funcional com 62 células padrão ocupou 0,81% do total.

Figura 6.8: Posicionamento e roteamento das células.



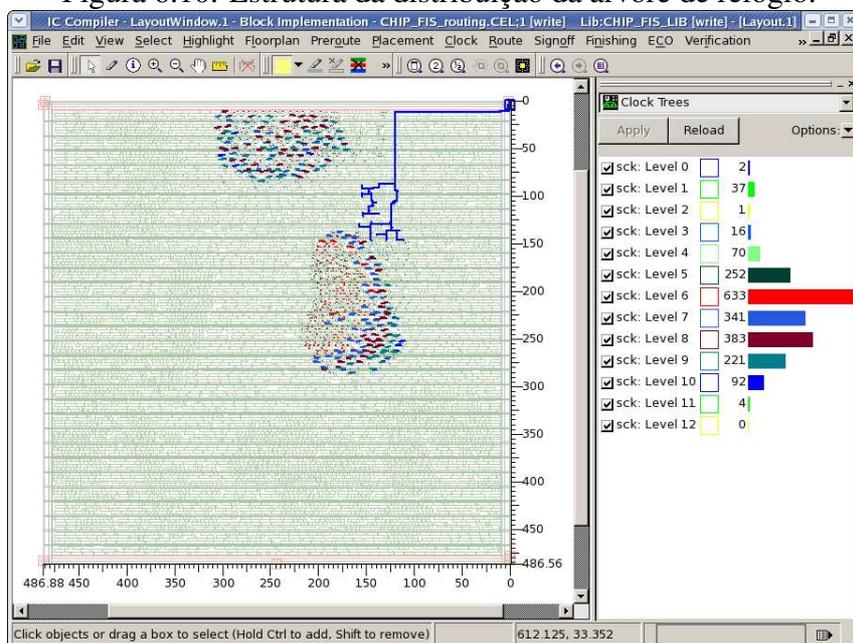
A distribuição de densidade de energia consumida do esquemático mapeado na biblioteca educacional da Synopsys *SAED 90 nm*, incluindo os registradores de entrada e saída que sincronizam o circuito, é mostrado na Figura 6.9. Poucos objetos apresentaram energia consumida por unidade de área acima de  $174057 \mu W/cm^2$ , sendo que 4 apresentaram maior densidade de consumo no valor de  $348113 \mu W/cm^2$ , porém todos esses pontos críticos encontram-se dispersos ao longo do circuito integrado, o que vem a minimizar seus efeitos.

Figura 6.9: Distribuição da densidade de energia consumida.



A estrutura da distribuição da árvore de relógio da Figura 6.10 mostra o sinal de relógio serial SCK dividido em 12 níveis dentro do chip. As barras coloridas desta ferramenta são histogramas e indicam a proporção de objetos para cada nível na árvore de relógio. Pode-se observar, a partir dessa ilustração, que o primeiro domínio (*Level 0*) do relógio serial SCK é estabelecido para dois objetos dentro da área do SPI (registradores de entrada e saída). O sétimo domínio (*Level 6*) está distribuído dentro da área ocupada pelo filtro adaptativo LMS com 633 objetos, dentre os diferentes domínios é onde se encontra a maior quantidade de objetos conectados.

Figura 6.10: Estrutura da distribuição da árvore de relógio.



### 6.1.3 Resultados da Síntese Física

A síntese física do chip com a biblioteca de células padrão *SAED 90 nm* (GOLDMAN et al., 2009) foi realizada, sem a necessidade de adicionar na sua implementação, blocos de propriedade intelectual ou de terceiros, processadores ou algum tipo de *software* embarcado. Esta versão implementada no ASIC foi capaz de processar os dados dos sensores com um relógio mínimo de  $4\text{ kHz}$  (permitindo o recurso de baixo consumo de energia) para detectar vários tipos de falhas mecânicas no estudo de caso.

Como as operações do sistema ocorrem em tempo real, todos os cálculos de processamento digital são processados durante o tempo de um período de amostragem na aquisição dos dados dos sensores. A amostragem do sinal dos sensores processada foi de  $256\text{ Hz}$  (onde, a frequência mínima de  $4\text{ kHz}$  é de  $256\text{ Hz} \times 16\text{ bits}$  da comunicação serial síncrona), o suficiente para satisfazer a frequência de *nyquist* na amostragem dos sinais, considerando a faixa de frequência de interesse para o atuador elétrico da Coester.

A eficácia do *hardware* proposto pode ser comprovada a partir dos resultados do processo de síntese e análise de temporização estática do projeto. Os resultados apresentados abaixo foram obtidos considerando um período de relógio de  $250\text{ }\mu\text{s}$ , restrições de relógio com 10% de margem ( $25\text{ }\mu\text{s}$  *setup* e *hold*) e 10% margem para atrasos de entrada/saída, e pós-síntese nas condições típicas de operação com tensão de alimentação de  $1,20\text{ V}$  e  $25\text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura. Considerou-se também, o pior e o melhor caso das condições de operação, com tensão de alimentação de  $0,70\text{ V}$  e  $1,32\text{ V}$ , e temperatura de  $125\text{ }^\circ\text{C}$  e  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente.

A Tabela 6.1 mostra de forma resumida resultados de análise estática de tempo, a fim de se determinar os valores máximos de tempos de chegada, de subida e de descida e os valores mínimos de tempos requeridos de subida e de descida do circuito.

Tabela 6.1: Análise de tempo do chip proposto.

Parâmetro	Tempo ( <i>ps</i> )
Tempo requerido dos dados	235000,00
Tempo dos dados de chegada	125000,56
<i>Slack</i>	109999,44

O termo *slack* da Tabela 6.1, com quantidade folgada de tempo  $0,11\text{ }\mu\text{s}$ , é definido como a diferença entre o tempo em que um sinal é necessário em um caminho mais crítico do circuito (tempo requerido) e o tempo em que o sinal chega de fato neste ponto (tempo

de chegada), considerando o período do relógio.

A Tabela 6.2 mostra a área mínima do sistema proposto ( $144493,67 \mu m^2$ ). O atraso de propagação máximo do caminho crítico é resultante do bloco SPI ( $5,95 ns$ ). Assim, a frequência máxima de operação do circuito é de  $168,07 MHz$ .

Tabela 6.2: Área do chip implementado em  $90 nm$ .

Parâmetro	Área ( $\mu m^2$ )
Área de lógica combinacional	107112,96
Área não combinacional	23977,26
Área de interconexões	13403,44
Área total da célula	131090,22
Área total	144493,67

A divisão da área total ocupada em termos de cada bloco foi de 12,9% para a DWT, 0,8% para o TPG, 7,0% para a EWMA, 76,6% para o FILTRO LMS, 0,9% para o FDI, 1,3% para o SPI e 0,5% para as portas de interface (*tristate, mux e latch*).

Devido à baixa frequência de relógio e à implementação de *clock gating*, foi obtido baixo consumo de energia dinâmica. Portanto, pode-se notar na Tabela 6.3, a influência da corrente de fuga no gasto de energia deste projeto.

Tabela 6.3: Dissipação de energia do chip implementado em  $90 nm$ .

Potência estática ( $\mu W$ )	Potência dinâmica ( $nW$ )	Potência total ( $\mu W$ )
654,37	26,61	654,39

A divisão do consumo total em termos de cada bloco foi de 12,5% para a DWT, 0,8% para o TPG, 5,8% para a EWMA, 77,6% para o FILTRO LMS, 1,0% para o FDI, 1,6% para o SPI e 0,7% para as portas de interface (*tristate, mux e latch*).

## 6.2 Desenvolvimento do Chip na Biblioteca Comercial de $0,6 \mu m$

Nesta etapa de desenvolvimento do trabalho havia a possibilidade de submeter este trabalho ao Projeto Multiusuário Brasileiro (PMUB) no Centro de Excelência em Tecnologia Eletrônica Avançada (CEITEC) (CEITEC, 2018). Por isso, as sínteses do circuito também foram realizadas nas ferramentas da Cadence denominadas de RC (*En-*

*counter RTL Compiler*) e EDI (*Encounter Digital Implementation*) considerando a biblioteca XC06 da empresa X-FAB (X-FAB, 2018) para fabricação de um ASIC na tecnologia CMOS de  $0,6 \mu m$ .

### 6.2.1 Síntese Lógica do Chip

A síntese lógica foi realizada na ferramenta RC, onde a descrição do sistema completo em um nível de abstração usando uma linguagem de descrição de *hardware* (HDL - *Hardware Description Language*), com informações do comportamento do circuito integrado e a montagem do leiaute RTL foi transformada em um arquivo de baixo nível implementado em termos de interligações entre portas lógicas (*Gate-Level Netlist*), correspondentes às disponíveis na biblioteca XC06, processo intermediado pela empresa CEITEC S.A. (CEITEC, 2018).

Para iniciar o fluxo do RC na biblioteca comercial XC06, além da implementação em RTL, os seguintes arquivos foram necessários:

- Bibliotecas no formato *Liberty Timing Files*: Contendo informações de temporização, de dissipação de energia interna e estática das células. Arquivos fontes *D\_CELLS\_typ\_3\_3V\_25C.lib* e *IO\_CELLS\_F\_typ\_3\_3V\_25C.lib*.
- Bibliotecas no formato *Library Exchange Format*: Contendo informações físicas das camadas de metal presentes (dimensões e vias utilizadas para interligação entre camadas) e o formato de cada célula (pinagem e sua distribuição nas camadas de metal). Arquivos fontes *xc06\_m3\_FE.lef*, *D\_CELLS.lef* e *IO\_CELLS\_F.lef*.

Toda a elaboração da síntese lógica do projeto foi executada através de funções, *scripts* e macros escritos na linguagem de comandos de uma ferramenta (TCL - *Tool Command Language*).

Dessa forma, também foram gerados arquivos de restrições de projeto referentes à biblioteca da tecnologia adotada para o próximo passo no fluxo de projeto que corresponde à síntese física do circuito. O comando *report gates* foi utilizado para extração do relatório da Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Circuitos digitais utilizados na síntese lógica.

<b>Circuitos digitais</b>	<b>Instâncias</b>	<b>Área (<math>\mu m^2</math>)</b>
lógico	5817	3216095,52
sequencial	655	790817,28
inversor	1155	140870,40
<i>buffer</i>	48	8743,68
<i>tristate</i>	1	303,60
<i>clock gating</i>	4	2914,56
Total	7680	4159745,04

### 6.2.2 Síntese Física do Chip

A ferramenta EDI foi utilizada com os arquivos de projeto *Gate-Level Netlist* e de restrições da Synopsys (SDC - *Synopsys Design Constraints*) gerados na ferramenta RC da síntese anterior. Deste modo, foram seguidas todas as etapas do fluxo de projeto para elaboração do leiaute funcional com base nas informações da biblioteca XC06: posicionamento dos blocos, definição dos pinos de alimentação, criação do anel e linhas de alimentação, roteamento dos sinais de alimentação, colocação das células padrão de cada bloco, roteamento entre todas as células e verificação das regras do projeto.

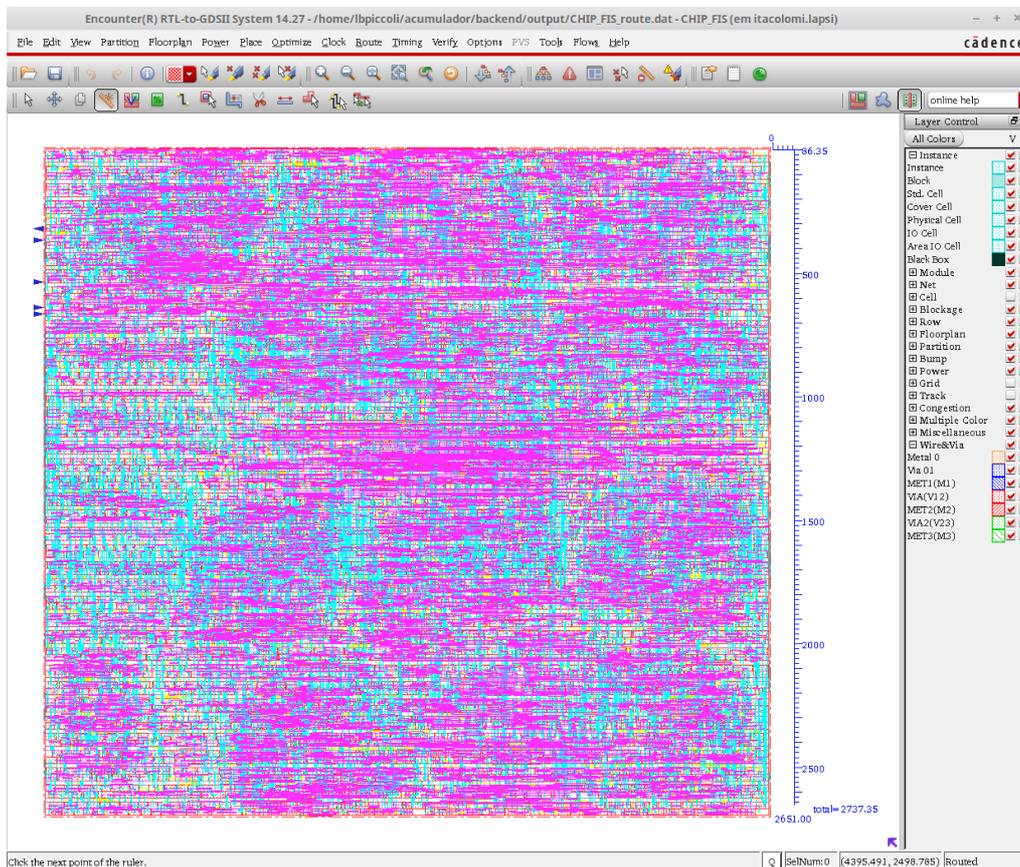
### 6.2.3 Resultados da Síntese Física

O processo de síntese física da Figura 6.11, otimizado para atender às especificações exigidas, consiste em 3 camadas de metais para o roteamento. As barras de alimentação verticais foram adicionadas na camada de metal 1 e conectadas ao anel de alimentação na camada de metal 2; Ao redor do circuito, os anéis de alimentação foram posicionados nas camadas de metal 2 e 3 para trilhas horizontais e verticais, respectivamente; Para evitar erros na verificação de regras de projeto (DRC - *Design Rule Checking*), o roteamento de sinal e da árvore de relógio ocorreu entre as camadas de metal 1, 2 e 3.

Como principais resultados da síntese física do chip, podem ser destacados a área total de células de  $4153612,32 \mu m^2$ , o consumo de energia estimado de  $43,61596 \mu W$  para um relógio de  $20 kHz$  e o tempo para estabilizar o sinal no caminho combinacional mais longo (caminho crítico do bloco SPI) de  $25 ms$  ( $25002287 ps$ ). Como o período

do sinal de relógio é de  $50 \mu s$  e 10% de margem para atraso externo de  $5 \mu s$ , tem-se uma margem de  $19,99 \mu s$ , denominada de *slack*. Deste modo, a frequência máxima de operação do circuito é de  $39,99 MHz$ .

Figura 6.11: Síntese física do chip de predição de falhas em  $0,6 \mu m$ .



A dissipação de energia do chip é mostrada na Tabela 6.5, onde o maior consumo de energia é da lógica combinacional. Isso deve ao fato que o maior número de instâncias e área ocupada pertencem aos circuitos lógicos, ver Tabela 6.4.

Tabela 6.5: Dissipação de energia do chip implementado em  $0,6 \mu m$ .

Potência estática ( $\mu W$ )	Potência dinâmica ( $\mu W$ )	Potência total ( $\mu W$ )
40,31	3,31	43,62

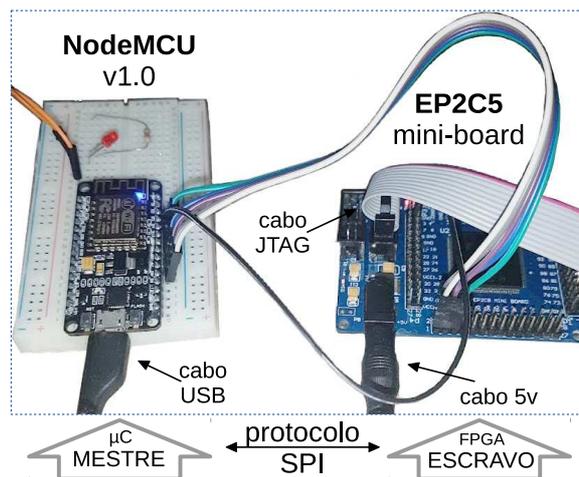
A diferença dos resultados de síntese entre as bibliotecas de  $90 nm$  da Tabela 6.3 e  $0,6 \mu m$  da Tabela 6.5, deve-se à diferença de tensão de alimentação ( $1,2 V$  e  $3,30 V$ , respectivamente), de relógio ( $4 kHz$  e  $20 kHz$ , respectivamente), de área ( $144493,67 \mu m^2$  e  $4159745,04 \mu m^2$ , respectivamente) e da quantidade de portas lógicas ou blocos específicos implementados da biblioteca utilizada.

### 6.3 Desenvolvimento do sistema com Microcontrolador e FPGA

O objetivo da prototipação em FPGA é obter um *hardware* funcional que possa ser validado em trabalhos futuros utilizando a bancada existente, e que possa também facilitar a sua implementação em outras aplicações.

A arquitetura do projeto proposta para aplicações distribuídas da seção 5.5 são possíveis através da união entre dois módulos. O primeiro trata dos algoritmos FDS e FDI com interface de comunicação SPI embarcados em FPGA, onde os cálculos para detecção e predição de falhas são realizados em tempo real, o segundo, sobre o microcontrolador que serve de interface de funcionamento e comunicação. A prototipação do projeto com os módulos de FPGA (Escravo no protocolo de comunicação SPI) e microcontrolador (Mestre) são mostrados na Figura 6.12.

Figura 6.12: Conexão do sistema com FPGA e microcontrolador.



A comunicação entre os dispositivos foi realizada com o protocolo SPI, utilizando os pinos de entrada e saída do microcontrolador (mestre) e do FPGA (escravo). O comando **SPI.transfer16** da biblioteca do microcontrolador foi utilizado para enviar e receber dados de dois *bytes* entre os dispositivos. A seguir, é listado o código da função **setupFPGA**, utilizado para configurar a plataforma.

```
void setupFPGA () {
    pinMode(CS, OUTPUT); // configura o pino seletor como saída
    digitalWrite(CS, LOW); // coloca o pino do escravo em nível baixo
    SPI.begin(); // ingressa ao barramento SPI
    SPI.setDataMode(SPI_MODE0); // define o modo de comunicação
    SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV2); // divisor do clock principal
    SPI.setFrequency(4000); // Ajusta frequência (4kHz)
    SPI.setBitOrder(MSBFIRST); // Bit mais significativo primeiro
}
```

A conexão e função de cada pino entre os dispositivos da Figura 6.12 são mostradas na seguinte Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Conexão entre os módulos de FPGA e microcontrolador.

Descrição	NodeMCU $\mu C$ Mestre		← Placas → Conexão	EP2C5 FPGA Escravo	
	Pino	Nome		Pino	Nome
Massa (terra)	G	GND	← terra →	2	GND
Autoteste funcional do chip	-	-	Botão do FPGA	144	TST
<i>Status</i>	-	-	LED-0 do FPGA	3	STS
Reiniciar chip	2	D4	Mestre → Escravo	44	RST
Relógio de sincronização	14	D5	Mestre → Escravo	43	SCK
Dados do Escravo para Mestre	12	D6	Escravo → Mestre	42	SDO
Dados do Mestre para Escravo	13	D7	Mestre → Escravo	41	SDI
Seleção do Escravo	15	D8	Mestre → Escravo	40	CSN

O modelo de FPGA da empresa Altera do kit de desenvolvimento EP2C5 *mini-board* é o EP2C5T144C8, que é um dispositivo de baixo custo comercial e possui poucos recursos dentro da família Cyclone II, com apenas 4.608 unidades lógicas internas, mas o suficiente para este projeto. A placa NodeMCU é uma plataforma de baixo custo para a Internet das coisas, de código aberto, possui um microcontrolador ESP8266 de arquitetura com um conjunto reduzido de instruções (RISC - *Reduced Instruction Set Computer*) de 32 bits, suporte integrado à rede WiFi™ e serviços de comunicação serial SPI.

### 6.3.1 Implementação dos algoritmos em FPGA

O projeto do chip em *hardware*, com sistema FDI, FDS e uma interface de comunicação SPI, foi implementado e sintetizado na ferramenta Altera Quartus II v9.1. A frequência máxima de operação obtida  $f_{\max}$  foi de 52,59 MHz (período de 19,014 ns), e os resultados de ocupação no dispositivo considerado são apresentados na Tabela 6.7.

O resultado nulo para blocos de memória utilizados e o baixo número de elementos lógicos, revelam que o sistema é adequado para uma implementação eficiente (do ponto de vista de ocupação de área) em ASIC. Isso porque em um projeto com biblioteca de células padrão para ASIC, os circuitos digitais são elaborados com base em portas lógicas

elementares, sendo assim, as memórias sintetizadas consomem muito mais espaço na pastilha que os demais circuitos. Portanto, este projeto sintetizado em FPGA pode ser convertido e validado também em um leiaute de ASIC.

Tabela 6.7: Ocupação do chip no dispositivo EP2C5T144C8.

	<b>Utilizados</b>	<b>Disponíveis</b>	<b>Ocupação</b>
Total de elementos lógicos	894	4608	19 %
Total de funções combinacionais	775	4608	17 %
Total de registradores lógicos	407	4608	9 %
Total de pinos	9	89	10 %
Total de memória ( <i>bits</i> )	0	119808	0 %
Multiplicadores embarcados	24	26	92 %
PLLs	0	2	0 %

### 6.3.2 Testes Simulados com FPGA

Os testes foram realizados em kits de baixo custo comerciais EP2C5 mini-board e NodeMCU no valor de U\$ 17 e U\$ 8, respectivamente, totalizando U\$ 25 dólares (SERVICES, 2018). O NodeMCU consegue se comunicar com o PC enviando e recebendo dados através do barramento serial universal (USB - *Universal Serial Bus*). Através de um monitor serial no ambiente de desenvolvimento integrado (IDE - *Integrated Development Environment*) do dispositivo para o PC, alguns valores foram trocados a fim de testar o sistema.

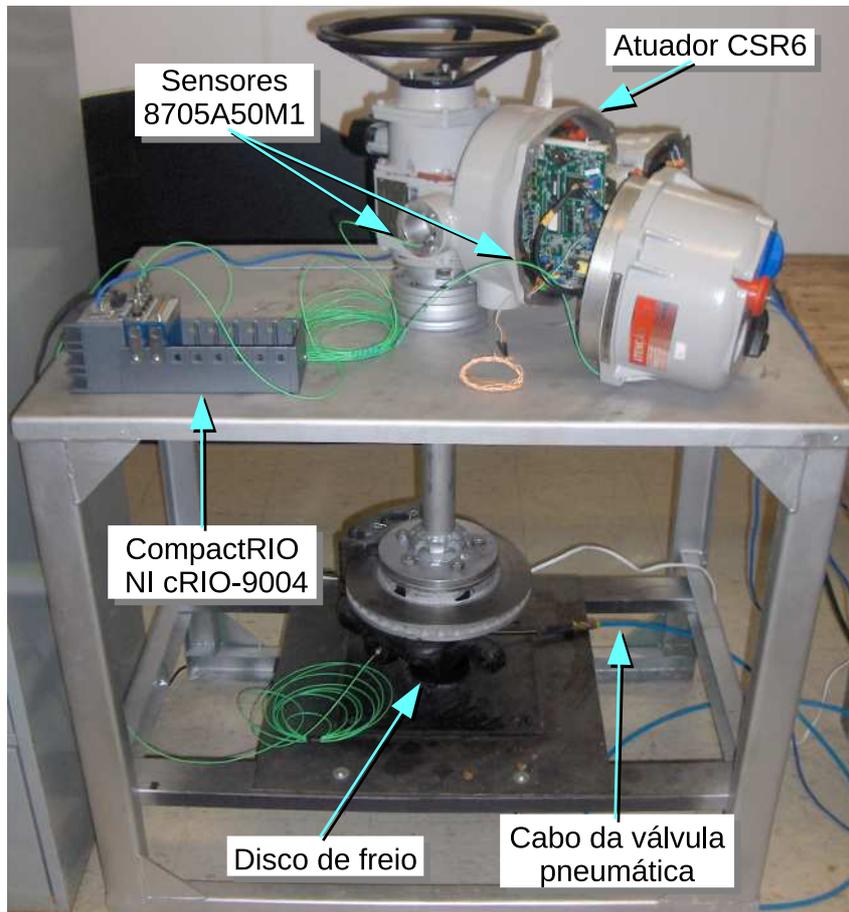
### 6.4 Experimentos com a Bancada de Teste

As técnicas de manutenção inteligente, para que sejam validadas em diversas situações ocorridas quando em operação de um sistema em ambiente de produção industrial, precisam de ensaios com possíveis comportamentos do equipamento sejam estes de operação normal, degradação ou falha.

Desta forma, a bancada de testes do Laboratório de Controle, Automação e Robótica (LASCAR), proposta por HENRIQUES et al. (2010), foi desenvolvida para a realização de ensaios de esforços, injeção de falhas e verificação do comportamento dinâmico do atuador da empresa Coester Automação.

A Figura 6.13 mostra o conjunto de equipamentos instalados na bancada, projetados para configurar comportamentos e situações similares aos defeitos mais comuns encontrados em campo, onde o equipamento torna-se suscetível à ação da degradação tais como: desgaste, corrosão, trincas e danos causados por operadores.

Figura 6.13: Atuador instrumentado na bancada de teste.



A bancada é composta por um atuador elétrico CSR6 da empresa Coester Automação, acelerômetros 8705A50M1 da empresa Kistler, posicionados em pontos específicos do atuador, uma controlador CompactRIO NI cRIO-9004 com placa de aquisição de dados da empresa National Instruments (ARCHITECTURES; PRACTICES, 2009), uma válvula de ar comprimido MPT40 da empresa Parker e um disco de freio.

O equipamento CompactRIO foi utilizado em conjunto com o *software* LABVIEW (SUMATHI; SUREKHA, 2007) para controle da abertura e fechamento da válvula pelo atuador elétrico e aquisição de dados dos sensores de vibração e torque.

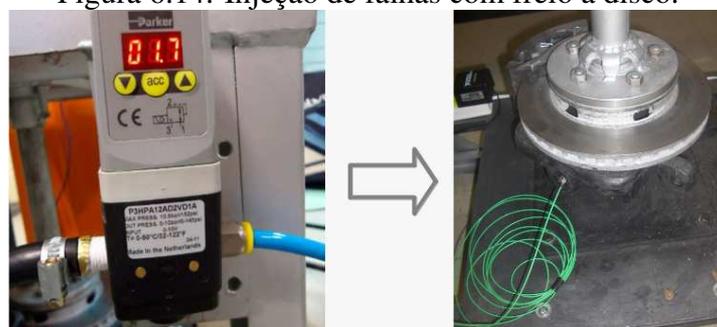
Os esforços mecânicos exercidos pelo atuador e a simulação do fluxo de fluidos no interior da válvula durante os movimentos de abertura ou fechamento, são regulados pela válvula de ar comprimido que, por sua vez, exerce pressão no sistema de freio a disco acoplado ao eixo do atuador.

### 6.4.1 Descrição dos Testes

Um tipo de teste para injeção de falhas com a bancada, causando variações no torque e vibração do conjunto atuador válvula, foi realizado com o uso do disco de freio. O mesmo, ver Figura 6.14, encontra-se instalado junto ao rolamento onde está conectada a haste da válvula, sendo acionado e regulado por meio de uma válvula proporcional pneumática que controla o fluxo de ar comprimido vindo de um compressor.

Deste modo, é possível realizar uma simulação de possíveis esforços que a válvula exerce ao ser acionada pelo atuador, situação essa enfrentada na presença de falhas e em função da passagem dos fluidos na tubulação.

Figura 6.14: Injeção de falhas com freio a disco.



(a) Válvula pneumática. (b) Freio a disco.

Comparando as falhas injetadas utilizadas para simular os diversos tipos de esforços a que o conjunto se submete em campo, a variação brusca do torque pode indicar um evento de falha como a quebra de uma peça, obstrução na passagem do corpo da válvula (sede da válvula), por exemplo. Diferentes níveis de pressão no freio, podem indicar também uma condição de degradação do sistema ao longo de sua utilização.

A simulação do atuador na bancada de teste com injeção de falhas, também foi realizada através da substituição de engrenagens com níveis diferentes de degradação. As engrenagens utilizadas no estudo de caso são ilustradas na Figura 6.15, uma engrenagem em condição normal e outras duas apresentando falhas por desgastes e dentes fraturados.

Figura 6.15: Engrenagens usadas nos testes para injeção de falhas.



Engrenagens de redução, eixos articulados e rolamentos, tipicamente são os primeiros componentes a sofrerem falhas, devido ao desgaste de uso e a cargas aplicadas (BEGG; BYINGTON; MAYNARD, 2000; ZAKRAJSEK; LEWICKI, 1998). Nesses casos, os estudos demonstram a existência de mudanças no padrão de vibração do equipamento em decorrência da degradação dos dentes das engrenagens. A degradação começa com desgaste e uma fissura no dente da engrenagem, apresentando um pequeno entalhe na área do filete de um dente até evoluir em alguns segundos na sua ruptura, desde que mantida uma determinada carga.

Dessa forma, o atuador na bancada de teste está instrumentado com sensores tanto de torque (visando os ensaios com pressão no disco de freio) quanto de vibração (visando a obtenção dos níveis de vibração da estrutura com diferentes engrenagens).

De acordo com os trabalhos anteriores (BÖESCH, 2011; FACCIN, 2011; PICCOLI et al., 2012), o acelerômetro acoplado ao eixo do motor é o que apresenta melhores resultados em termos de sinal de vibração para a detecção da degradação das engrenagens do atuador. Com isso, as informações foram coletadas no sistema de aquisição de dados por meio de um sensor de vibração e outro de torque distribuídos no equipamento conforme mostra a Figura 6.16.

Figura 6.16: Localização dos sensores instalados no atuador elétrico.



(a) Sensor de torque no compartimento do motor do atuador elétrico.

(b) Acelerômetro fixado na carcaça, próximo ao motor.

Para a realização dos testes do estudo de caso, a Tabela 6.8 mostra as operações efetuadas, que simulam os ciclos de abertura e fechamento da válvula sob condições normais e de falha.

Tabela 6.8: Ciclos realizados de testes experimentais.

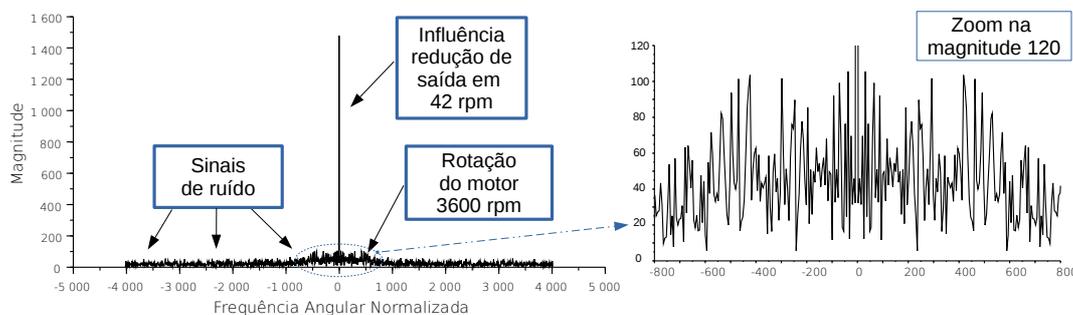
Condição	Descrição
Normal	Ciclo normal a vazio e sem esforço externo sobre o sistema
Falha tipo 1	Ciclo com pressão no freio equivalente a $100 \text{ kPa}$
Falha tipo 2	Ciclo com pressão no freio equivalente a $300 \text{ kPa}$
Falha tipo 3	Ciclo executado usando duas engrenagens desgastadas
Falha tipo 4	Ciclo executado utilizando uma engrenagem com três dentes fraturados
Falha tipo 5	Ciclo executado com engrenagens boas, mas sem lubrificação

O ciclo normal de acionamento do atuador elétrico, consiste em um movimento completo de abertura e fechamento do obturador da válvula, isso sem interrupção e sem esforço adicional. O ciclo com pressão no freio equivale à força exercida do obturador com a passagem do fluido, obstruções, sedimentos na base, entre outros. O ciclo executado com substituição de engrenagens simula a degradação ocorrida no acoplamento da caixa de redução do atuador e nos rolamentos. Já a falta de lubrificação das engrenagens, simula demais defeitos apresentados pela ausência de manutenção na válvula.

#### 6.4.2 Espectro de Frequência dos Sinais de Teste

Considerando os fundamentos teóricos de DSP, mais especificamente a transformada discreta de Fourier das amostradas dos sinais de operação normal e com falhas realizados experimentalmente, podem-se elaborar os gráficos de operação da válvula em condições normais: na Figura 6.17 com sensor de vibração; e na Figura 6.18 com sensor de torque.

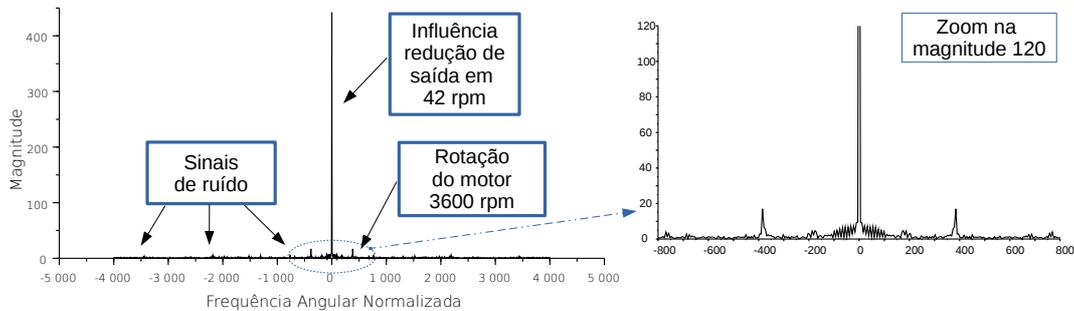
Figura 6.17: Espectro de frequência do acelerômetro em condições normais.



O modelo CSR6 do atuador da Coester tem rotação de saída no redutor de  $42 \text{ rpm}$  e rotação do motor de  $3600 \text{ rpm}$  (seção 4.3.1), frequência angular de  $377 \text{ rad/s}$  e  $4,4$

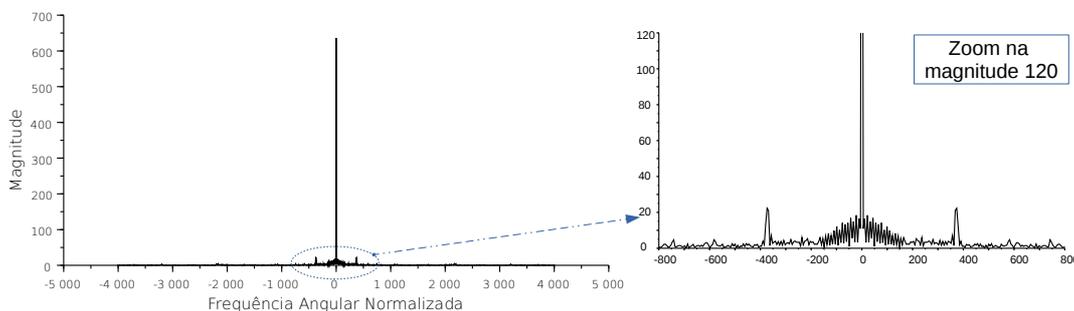
$rad/s$ , respectivamente. Pode-se notar, que em condições normais, a presença de ruídos são mais intensos com os sinais de vibração (Figura 6.17) do que com os sinais de torque (Figura 6.18). Em ambas leituras, a influência das harmônicas da caixa de redução tem picos elevados.

Figura 6.18: Espectro de frequência do sensor de torque em condições normais.



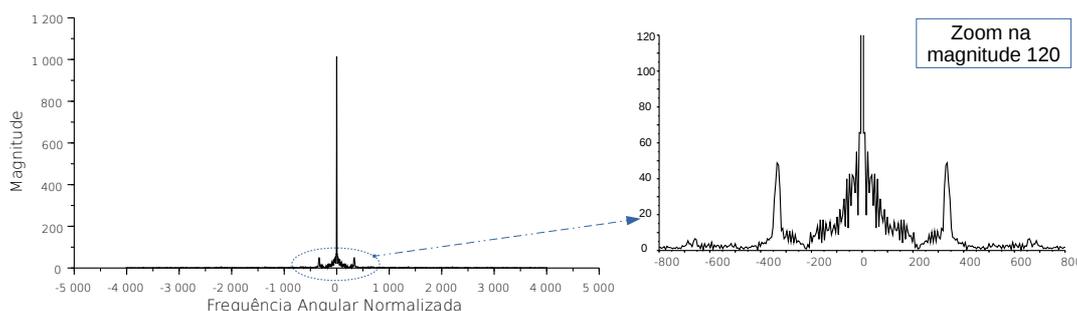
Os gráficos de operação da válvula com injeção de falhas e leitura do sensor de torque é apresentado na Figura 6.19 por pressão no disco de freio de  $100\text{ kPa}$ , e na Figura 6.20 com pressão de  $300\text{ kPa}$ .

Figura 6.19: Espectro de frequência do sensor de torque com pressão de  $100\text{ kPa}$ .



Pode-se notar em geral, que os sinais de ruído permanecem com mesma magnitude, porém nas frequências menores que  $400\text{ rad/s}$  da Figura 6.20 aumentam em relação à Figura 6.19.

Figura 6.20: Espectro de frequência do sensor de torque com pressão de  $300\text{ kPa}$ .



Os gráficos de operação da válvula com injeção de falhas e leitura do sensor de

vibração, é apresentado na Figura 6.21 por engrenagem com dente desgastado, na Figura 6.22 por engrenagem com dente fraturado, e na Figura 6.23 por engrenagens sem lubrificação.

Figura 6.21: Espectro de frequência do acelerômetro para engrenagens desgastadas.

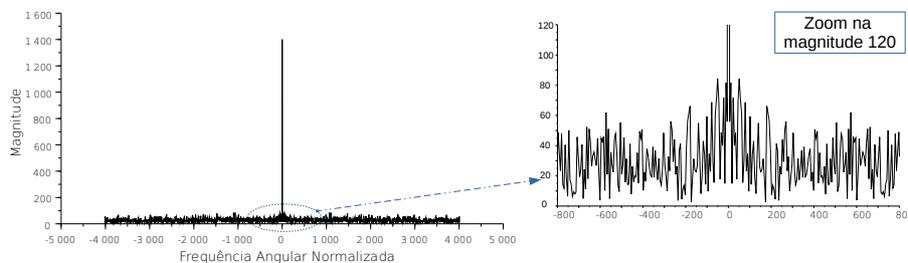


Figura 6.22: Espectro de frequência do acelerômetro para engrenagens com dentes fraturados.

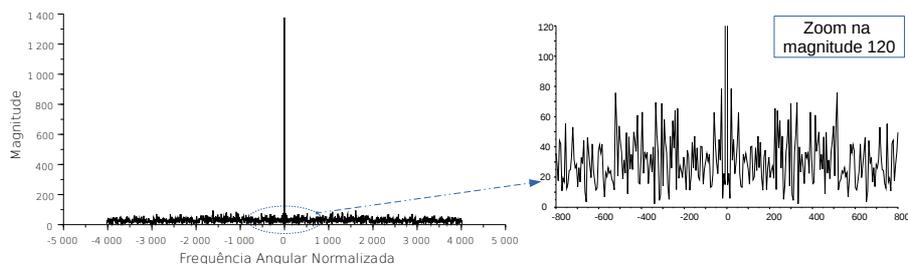
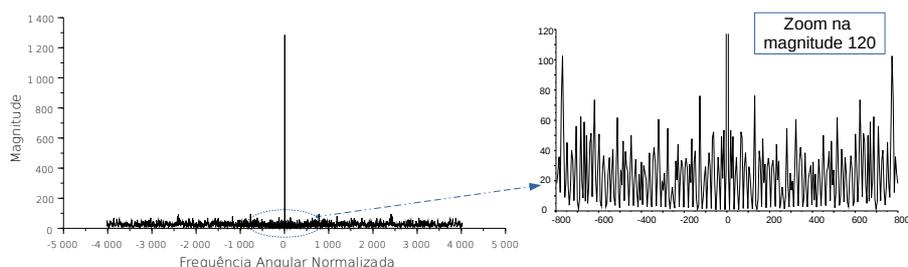


Figura 6.23: Espectro de frequência do acelerômetro para engrenagens sem lubrificação.



Salvo as medidas realizadas pelo sensor de torque, os gráficos demonstram que pela análise espectral de frequência deste estudo de caso, não se consegue extrair muita informação. Nas leituras de vibração, dificilmente um especialista, seja humano ou por inteligência artificial, sem um bom treinamento conseguirá tomar decisões baseadas nestes resultados, a não ser que utilize outras técnicas tais como FDS e FDI validadas na próxima seção 6.5. Essa dificuldade é apontada por inúmeros artigos recentes, seja no transporte, na aeronáutica e na geração de energia, que o problema mais comum encontrado em diversas aplicações reais é a sua baixa relação sinal e ruído encontrada entre interferências não-estacionárias e não-lineares.

## 6.5 Simulações do Chip Pós-síntese Física

O propósito principal da simulação pós-síntese física é a de verificar com maior exatidão, o desempenho da implementação do ASIC da seção 6.1.3, e se o projeto está dentro das especificações pretendidas.

Foi desenvolvido no computador uma aplicação em linguagem *bash script* para que todo o processo de teste do ASIC, desde a configuração até o armazenamento e exibição dos resultados em forma de gráfico, pudesse ser automatizado. A Figura 6.24 mostra sua interface, onde o usuário pode selecionar o tipo de teste, configurar o modo de operação do chip (aproximação ou detalhe), o ganho do sensor e o coeficiente de adaptação.

Figura 6.24: Interface *bash script* para configurar e executar macros.

```

leonardo@leonardo-nt ~/asic_chip/chip_generator/dados
Arquivo Editar Ver Pesquisar Terminal Ajuda
Gera o sinal de entrada e configura o chip FIS
-----
Modelo CSR6 - Rotação Saída 42 rpm (0,7 Hz) - Rotação Motor 3600 rpm (60 Hz)
-----
Sensor 1 Acelerômetro do freio
Sensor 2 Acelerômetro do sem fim
Sensor 3 Acelerômetro do motor
Sensor 4 Sensor de torque
frequencia de saída de 1200 Hz
-----
Escolha uma das opções abaixo:
[A] Apenas Ciclo normal
[B] Ciclo normal e Falha duas engrenagens desgastadas ou 1bar
[C] Ciclo normal e Falha engrenagens dente quebrado ou 3bar
[D] Sinais de simulação
[E] Falha duas engrenagens desgastadas ou 1bar
[F] Falha engrenagens dente quebrado ou 3bar
[G] Falha sem lubrificação (Corrente elétrica ou Vibração)
[Z] Gera espectro da frequencia da simulação anterior

c
Escolha o Modo aproximação ou detalhe (MAD):
[1] Detalhe: para ACELERÔMETRO que verifica as engrenagens
[2] Aproximação: para TORQUE que verifica a pressão da válvula

1
Digite o ganho do sensor [1.1]:
Digite o coeficiente MU [00FF]: █

```

Uma vez instalado um sensor com o sistema de predição de falhas no equipamento, o usuário pode realizar os ajustes de parâmetros relevantes para o processo (tensão de referência para o sensor e o valor do parâmetro de adaptação do filtro do FDS), ver seção 5.6.2. Os valores padrões recomendados já vêm predefinidos no chip, no entanto, o usuário pode modificá-los para melhorar a detecção de falhas, ou seja, realizar o treinamento do sistema para o estudo de caso ou processo em particular.

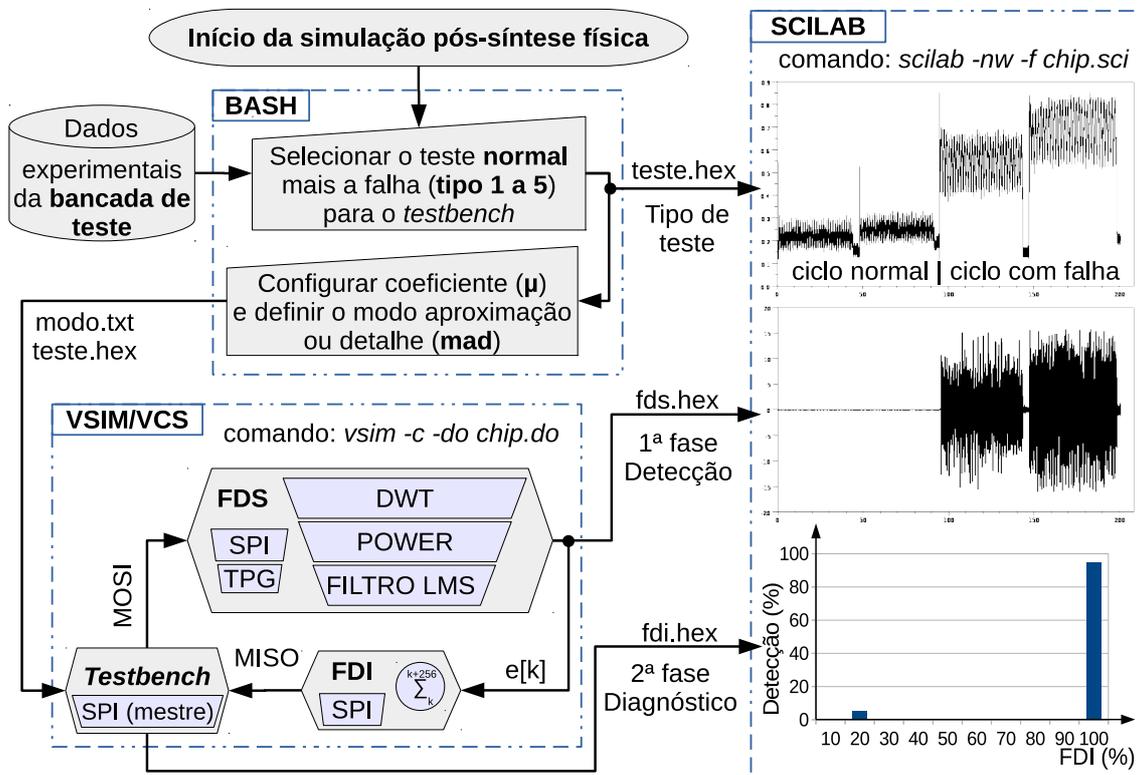
Em seguida, nos primeiros segundos de operação, deve ser selecionado o tipo de teste a ser realizado. Nos experimentos com a bancada (Tabela 6.8), foram aplicados ao sistema um ciclo normal com abertura e fechamento da válvula e em sequência, os ciclos

de falha específica. O sinal capturado foi armazenado e quantificado no formato Q de 16 bits para ser testado no leiaute físico da arquitetura FDS e FDI do chip.

Para regular a abrangência na detecção de possíveis falhas, conforme mostrado na seção 5.6.2, foi definido o modo de operação do chip (aproximação ou detalhe) e ajustado o valor do parâmetro de adaptação do filtro adaptativo LMS. Deste modo, a detecção e predição de falha pôde ser produzida na primeira fase com o bloco FDS e, na segunda fase, o diagnóstico com FDI pôde ser realizado em forma de histograma.

A Figura 6.25 mostra o fluxograma utilizado com os dados experimentais da bancada de teste da seção 6.4.1, representando as etapas de interação entre o usuário e o sistema a ser testado.

Figura 6.25: Interação entre o usuário e o sistema para os testes.



Na interface *bash script*, são selecionados os dados obtidos na banca de teste e criado um arquivo **teste.hex** e outro arquivo **modo.txt** com demais configurações a serem utilizadas. Feito isso, uma caixa de simulação em linha de comando inicia automaticamente a compilação de uma macro *chip.do* na aplicação *vsim* ("*vsim -c -do chip.do*"). Então um algoritmo *testebench* em *Verilog*, responsável por simular um SPI mestre, por configurar o chip, por enviar os valores dos sensores do equipamento sob teste e por capturar o resultado da saída do circuito, gera um arquivo de saída **fdi.hex** com a simulação do ASIC deste trabalho.

Próximo passo, o comando "`scilab -nw -f chip.sci`" com uma macro `chip.sci` é executado automaticamente no *bash script*, baseado nos arquivos carregados (**teste.hex**, **fds.hex** e **fdi.hex**), gera gráficos com informações do sinal do sensor, do FDS e do FDI com um histograma do teste realizado.

Deste modo, a ferramenta `Scilab` (NAGAR, 2017) é utilizada com o objetivo apenas de elucidar a interpretação dos resultados dos testes em forma de gráficos, onde são carregados os dados brutos obtidos com as informações produzidas pelo sistema na ferramenta `vsim` (MENTOR GRAPHICS CORPORATION, 2008) ou `VCS` com `CosmosScope` da Synopsys (BHATNAGAR, 2002).

Finalmente, de posse dos resultados no formato de um histograma, o usuário pode visualizar o estado de funcionamento do sistema com o índice de saúde do equipamento monitorado. Este procedimento foi utilizado em todos os testes das próximas subseções. O mesmo método também foi descrito em artigos e relatórios anteriores, até a primeira fase com FDS (PICCOLI et al., 2015a) e até a segunda com FDI (PICCOLI et al., 2015b).

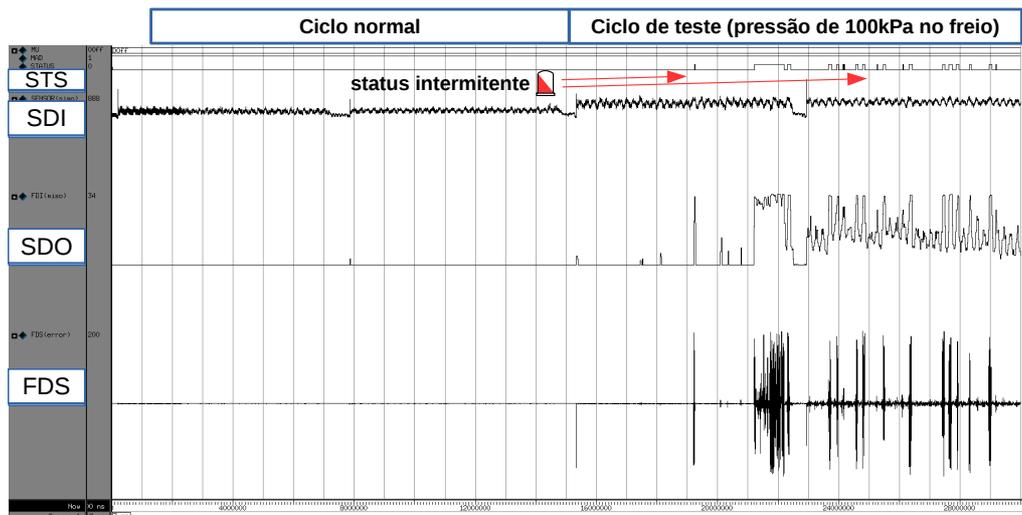
### 6.5.1 Simulação com Falha por Pressão no Freio de 100 $kPa$

Nessa simulação, foram usados dados do sensor de torque armazenados no computador do experimento, realizado na bancada de teste com pressão no freio equivalente a 100  $kPa$ . A aplicação em linguagem *bash script* descrita anteriormente, utilizou o algoritmo *testebench* juntamente com os dados do sinal de torque, para simular o *hardware* pós síntese via interface SPI do leiaute físico do chip.

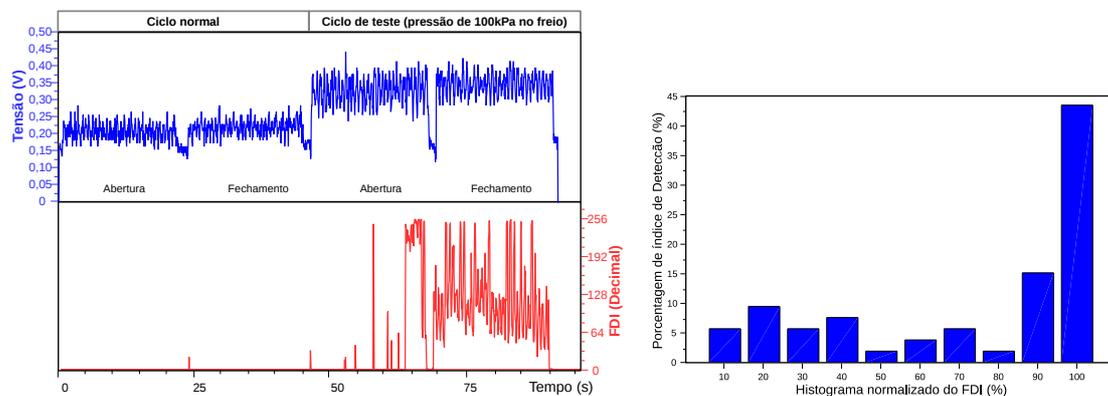
A Figura 6.27(a) mostra o gráfico gerado pela ferramenta `vsim`, onde o primeiro sinal representa o *status* (pino STS), o segundo sinal o valor do sensor recebido pela serial (pino SDI), o terceiro sinal mostra a saída do bloco FDI do chip pela serial (pino SDO) e o quarto sinal a resposta do bloco FDS do circuito representando ou não a falha detectada.

Pode-se notar que o sensor posicionado para medir o torque, apresenta um rápido e elevado aumento de amplitude, causado principalmente pelo arranque do motor. Porém, isso não reflete necessariamente uma falha (falso positivo) para o algoritmo FDS. Ao passo que, quando o motor entra em regime permanente sob pressão constante no freio de 100  $kPa$ , a falha é sinalizada corretamente pelo valor de erro de saída do FDS, tanto no processo de abertura, quanto no de fechamento da válvula. O sinal de *status* foi ativado algumas vezes seguidas durante o teste de injeção de falhas.

Figura 6.26: Experimento de falha com 100 kPa no disco de freio sobre a válvula.



(a) Sinais nos pinos do ASIC no Vsim.



(b) Sinal de torque de entrada e sinal FDI no Scilab. (c) Histograma do sinal do FDI no Scilab.

Conforme a Figura 6.27(b), o erro foi sinalizado para este tipo de falha. O histograma gerado na Figura 6.27(c), demonstra que a detecção ficou um pouco distribuída devido à repentina elevação do valor de pressão. Nesta simulação, a energia foi extraída dos coeficientes de aproximação utilizados da DWT, com valor de ganho do sinal de entrada igual a 1,1 e o coeficiente de adaptação do filtro LMS igual a 0,12 ( $\frac{00FF}{211}$ ), totalizando 435 detecções de 1563 leituras do FDI.

### 6.5.2 Simulação com Falha por Pressão no Freio de 300 kPa

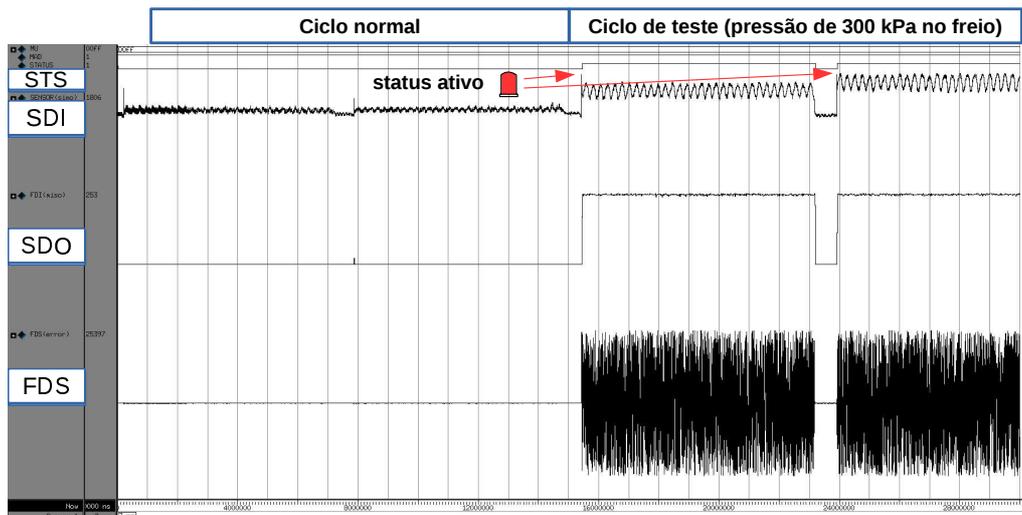
O mesmo procedimento da simulação anterior foi repetido, porém com pressão aplicada no freio equivalente a 300 kPa.

A Figura 6.28(a) mostra o gráfico produzido no vsim, onde o primeiro sinal representa o *status* (pino STS), o segundo sinal o valor do sensor recebido pela serial (pino SDI), o terceiro sinal mostra a saída do bloco FDI do chip pela serial (pino SDO) e o

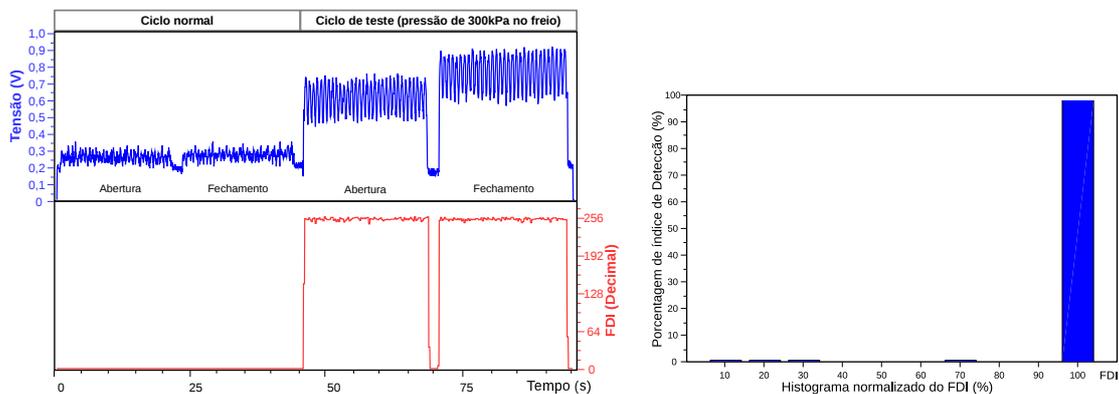
quarto sinal a resposta do bloco FDS do circuito representando ou não a falha detectada.

Ao aplicar a pressão de  $300\text{ kPa}$  e ativar o freio, o nível do sinal do sensor de torque tornou-se ligeiramente elevado. Então o processo passou para um novo estado, operando em uma situação mais exaustiva de falha. Na teoria, o valor do sensor deveria ser estacionário, mas a medição no ambiente real mostra que existe a presença do ruído, o que não impede o FDS de trabalhar adequadamente. O sinal de *status* sempre ficou ativado durante a injeção de falhas do teste realizado.

Figura 6.27: Experimento de falha com  $300\text{ kPa}$  no disco de freio sobre a válvula.



(a) Sinais nos pinos do ASIC no Vsim.



(b) Sinal de torque de entrada e sinal FDI no Scilab. (c) Histograma do sinal do FDI no Scilab.

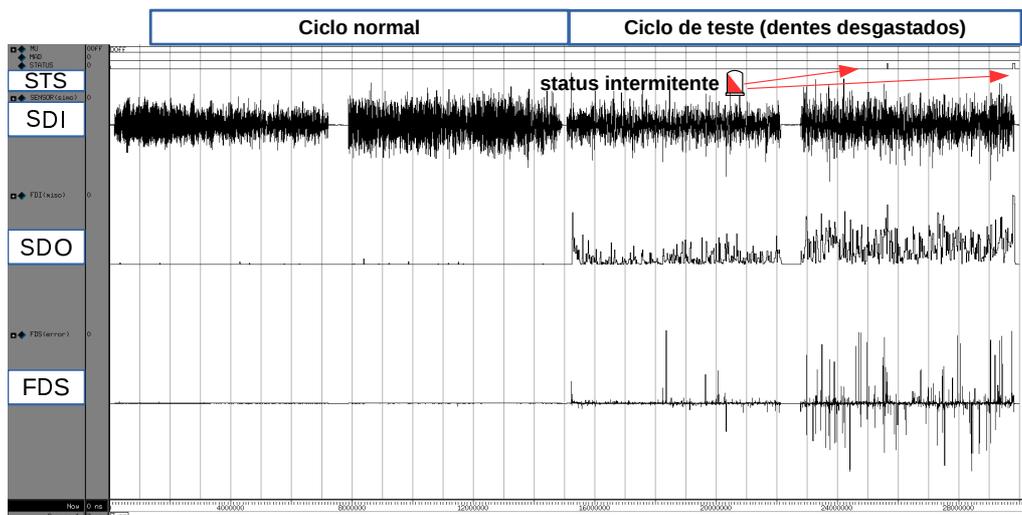
Conforme a Figura 6.28(b), o erro foi sinalizado para este tipo de falha. As barras do histograma gerado na Figura 6.28(c), demonstram que a detecção ficou concentrada à direita devido à pressão mais acentuada no disco de freio, com o triplo do valor utilizado em relação ao teste anterior. Nesta simulação, a energia foi extraída dos coeficientes de aproximação utilizados da DWT, com valor de ganho do sinal de entrada igual a 1,1 e o coeficiente de adaptação do filtro LMS igual a 0,12, totalizando 744 detecções (praticamente o dobro da simulação anterior) de 1563 leituras do FDI.

### 6.5.3 Simulação com Falha por Engrenagem de Dente Desgastado

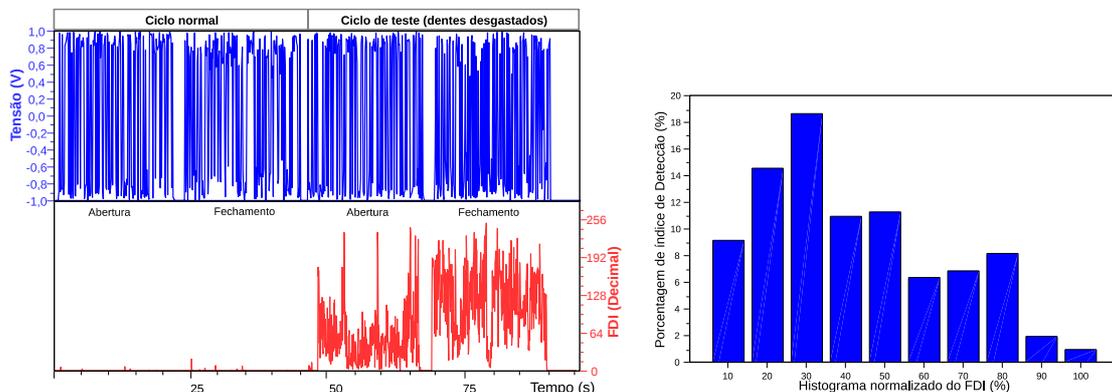
Nessa simulação, foram usados dados do sensor de vibração, armazenados no computador do experimento realizado na bancada de teste com uma engrenagem boa da caixa de transmissão do atuador, substituída por outra com dentes severamente desgastados. A aplicação em linguagem *bash script* utilizou o algoritmo *testebench* juntamente com dados do sensor de vibração, para simular o *hardware* pós síntese via interface SPI do leiaute físico do chip.

A Figura 6.29(a) mostra o gráfico gerado pela ferramenta *vsim*, onde o primeiro sinal representa o *status* (pino *STS*), o segundo sinal o valor do sensor recebido pela serial (pino *SDI*), o terceiro sinal mostra a saída do bloco *FDI* do chip pela serial (pino *SDO*) e o último sinal a resposta do bloco *FDS* do circuito representando ou não a falha detectada.

Figura 6.28: Experimento de falha com engrenagem de dente desgastado.



(a) Sinais nos pinos do ASIC no *Vsim*.



(b) Sinal de vibração de entrada e sinal FDI no *Scilab*. (c) Histograma do sinal do FDI no *Scilab*.

Conforme a característica do sinal de erro apresentado pelo sistema FDS, também pode-se detectar antecipadamente qual o tipo de falha que está ocorrendo. No gráfico da Figura 6.29(a), por exemplo, ao longo do tempo verifica-se a presença de variações no sinal de detecção de falhas no FDS, o que pode caracterizar um folga no acionamento das engrenagens devido ao seu desgaste. O sinal de *status* foi ativado duas vezes durante o teste de injeção de falhas.

Os resultados da Figura 6.29(b), demonstram que o erro foi sinalizado para este tipo de falha. As barras do histograma gerado na Figura 6.29(c), demonstram que a detecção ficou mais distribuída devido ao desgaste homogêneo nos dentes da engrenagem. Nesta simulação, a energia foi extraída dos coeficientes de detalhe utilizados da DWT, com valor de ganho do sinal de entrada igual a 1,1 e o coeficiente de adaptação do filtro LMS igual a 0,12, totalizando 674 detecções de 1563 leituras do FDI.

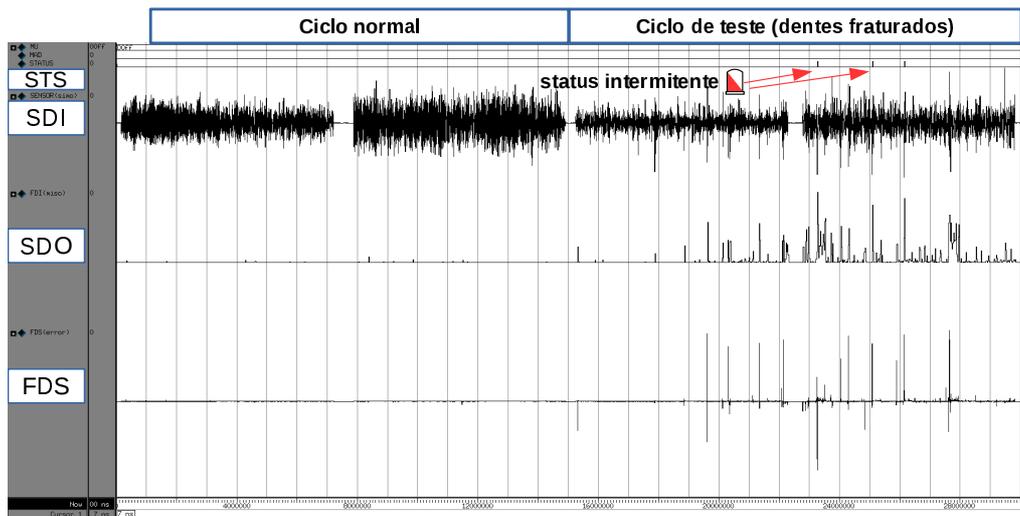
#### 6.5.4 Simulação com Falha por Engrenagem de Dente Fraturado

O mesmo procedimento da simulação anterior foi repetido, porém com dados do experimento realizado na bancada de teste com uma engrenagem boa da caixa de transmissão do atuador, substituída por outra com dentes fraturados. O *testebench*, juntamente com dados do sensor de vibração, foi utilizado para simular o *hardware* pós síntese via interface SPI do leiaute físico do chip.

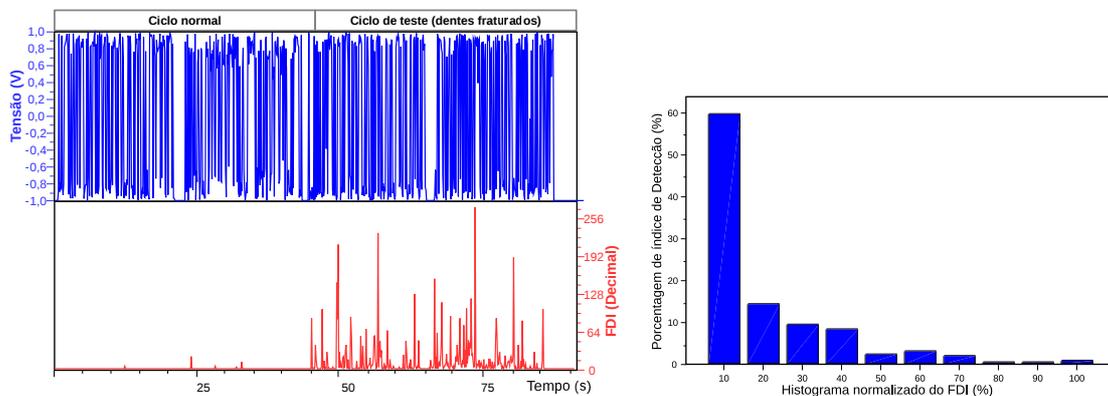
A Figura 6.30(a) mostra o gráfico produzido no *vsim*, onde o primeiro sinal representa o *status* (pino STS), o segundo sinal o valor do sensor recebido pela serial (pino SDI), o terceiro sinal mostra a saída do bloco FDI do chip pela serial (pino SDO) e o último sinal, a resposta do bloco FDS do circuito representando ou não a falha detectada.

Conforme a característica do sinal de erro apresentado pelo sistema FDS, também pode-se detectar antecipadamente qual o tipo de falha que está ocorrendo, por exemplo no gráfico da Figura 6.29(b) ao longo do tempo, ocorrem picos intercalados no sinal do FDS, o que caracteriza a assinatura da falha correspondente aos dentes fraturados da engrenagem. O sinal de *status* foi ativado três vezes durante o teste de injeção de falhas.

Figura 6.29: Experimento de falha com engrenagem de dente fraturado.



(a) Sinais nos pinos do ASIC no Vsim.



(b) Sinal de vibração de entrada e sinal FDI no Scilab. (c) Histograma do sinal do FDI no Scilab.

O sistema sinalizou a detecção da falha injetada pela notação mais à esquerda da distribuição das barras no histograma da Figura 6.30(c). A concentração do índice de detecção mais à esquerda deve-se ao fato de que a falha é detectada apenas quando os dentes danificados estão participando da transmissão do movimento, sendo assim um evento mais esporádico. Nesta simulação, a energia foi extraída dos coeficientes de detalhe utilizados da DWT, com ganho do sinal de entrada igual a 1,1 e o coeficiente de adaptação do filtro LMS igual a 0,12, totalizando 267 detecções de 1563 leituras do FDI.

### 6.5.5 Simulação com Falha por Engrenagens sem Lubrificação

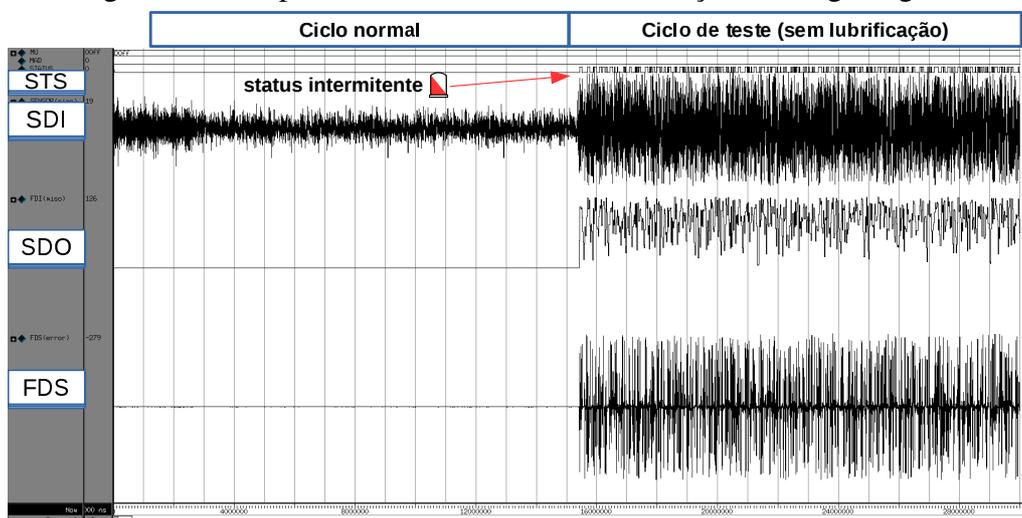
Nessa simulação, foram usados dados do sensor de vibração armazenados no computador do experimento, realizado na bancada de teste com as engrenagens da caixa de transmissão do atuador trabalhadas a seco sem lubrificação. O algoritmo *testebench* junta-

mente com dados do sensor de vibração, foi utilizado para simular o *hardware* pós síntese via interface SPI do leiaute físico do chip.

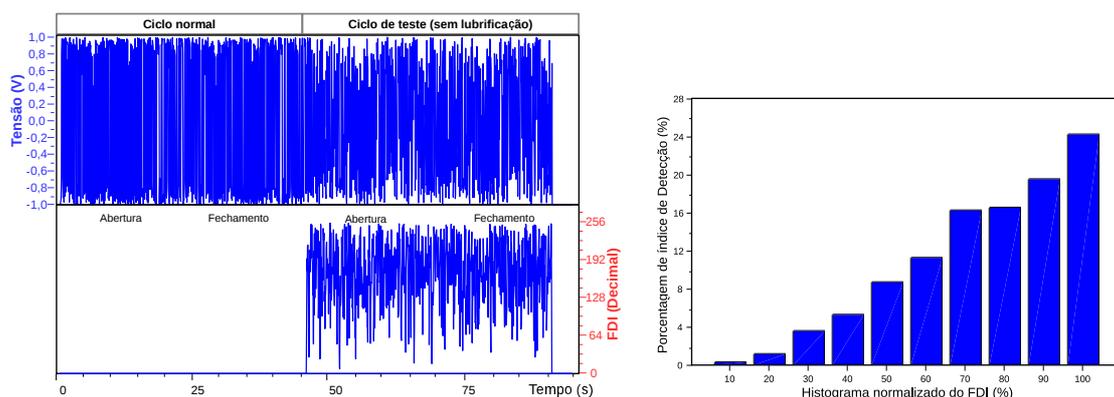
A Figura 6.31(a) mostra o gráfico gerado pela ferramenta *vsim*, onde o primeiro sinal representa o *status* (pino STS), o segundo sinal o valor do sensor recebido pela serial (pino SDI), o terceiro sinal mostra a saída do bloco FDI do chip pela serial (pino SDO) e o último sinal, a resposta do bloco FDS do circuito representando ou não a falha detectada.

Conforme a Figura 6.31(b), o efeito do atrito nas engrenagens sem lubrificação gerou mudanças sutis na vibração da máquina, mas o suficiente para o FDI identificar a sua falha. O sinal de *status* oscilou rapidamente durante o teste de injeção de falhas.

Figura 6.30: Experimento de falha sem lubrificação nas engrenagens.



(a) Sinais nos pinos do ASIC no *Vsim*.



(b) Sinal de vibração de entrada e sinal FDI no *Scilab*. (c) Histograma do sinal do FDI no *Scilab*.

Pode-se observar na Figura 6.31(c), que o erro foi sinalizado para este tipo de falha. As barras do histograma gerado demonstram que a detecção ficou distribuída mais à direita devido ao efeito do atrito (maior vibração e força exigida) nas superfícies das engrenagens. Nesta simulação, a energia foi extraída dos coeficientes de aproximação

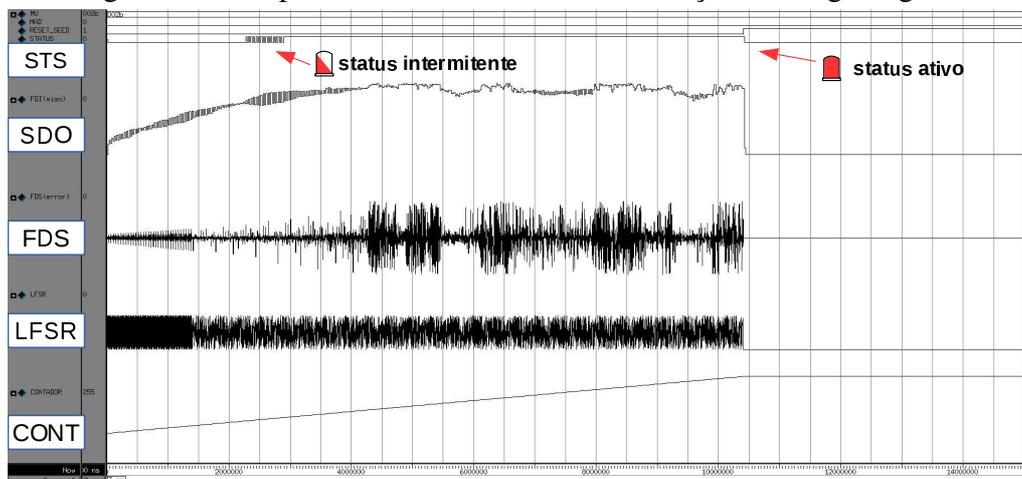
utilizados da DWT, com valor de ganho do sinal de entrada igual a 1,1 e o coeficiente de adaptação do filtro LMS igual a 0,12, totalizando 749 detecções de 1563 leituras do FDI.

### 6.5.6 Simulação de Autoteste Funcional

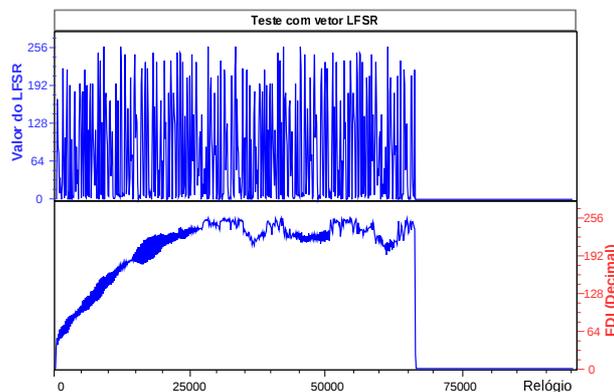
Nessa simulação, o autoteste (pino TST), descrito na seção 5.4.1, foi ativado. Com isso, o algoritmo *testebench* passou a operar em função de um vetor aleatório gerado internamente no circuito.

A Figura 6.32(a) mostra o gráfico gerado pela ferramenta *vsim*, onde o primeiro sinal representa o *status* (pino STS), o segundo sinal mostra a saída do bloco FDI do chip pela serial (pino SDO), o terceiro sinal mostra a resposta do bloco FDS do circuito representando ou não a falha detectada, o quarto sinal mostra o valor do vetor pseudoaleatório de teste na saída do bloco TPG do chip e o último sinal, o valor do bloco contador interno do chip que registra o número de eventos combinados entre a semente e o vetor do LFSR.

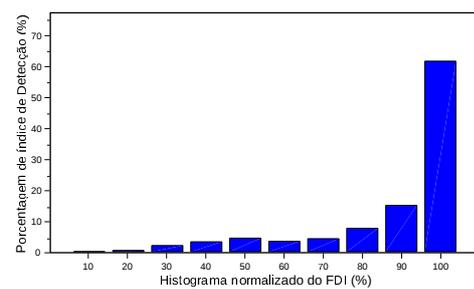
Figura 6.31: Experimento de falha sem lubrificação nas engrenagens.



(a) Sinais nos pinos do ASIC no *Vsim*.



(b) Sinal TPG interno e sinal FDI no *Scilab*.



(c) Histograma do sinal do FDI no *Scilab*.

A Figura 6.32(b) mostra, na ferramenta gráfica *Scilab*, o sinal interno do TPG até 65280 pulsos ( $255 \times 256$  igual aos estados do LFSR multiplicados pelo limite do contador) e o histograma, que por sua vez, revela o padrão de comportamento do circuito em modo autoteste. Durante o autoteste realizado, inicialmente o sinal de *status* ficou desligado, logo que o mesmo começou a oscilar rapidamente, foi ativado até que fosse cessada a geração de vetores pseudoaleatório do bloco TPG.

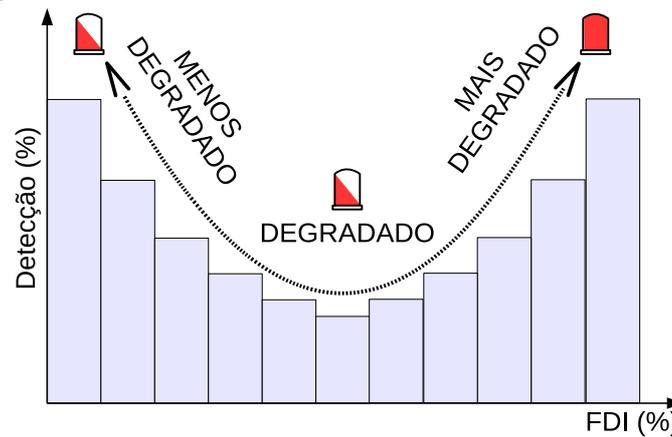
Então a geração de vetores de teste está embutida no circuito, enquanto que a verificação da assinatura do autoteste é realizada pela observação da Figura 6.32(c) em forma de um histograma. O controle do teste é realizado na interface do circuito e na comunicação serial SPI pelo algoritmo *testebench*: pino CS para habilitar o circuito; pino SCK para fornecer pulso de relógio; pino RST para reiniciar o teste. Com isso, pode-se desempenhar uma verificação funcional da mesma forma que em uma arquitetura de autoteste integrado (BIST - *Built-in Self-Test*) genérica (BEZERRA; VARGAS; GOUGH, 2001), onde os módulos responsáveis pela geração de vetores de teste, comparação da resposta (assinatura) e controle do fluxo de teste são incorporados em *hardware*. Ressalta-se que a estrutura desenvolvida tem como objetivo realizar apenas um teste funcional (faltando um teste estrutural completo), obtendo assim a garantia de que os blocos internos do chip estejam funcionando conforme suas especificações.

## 6.6 Discussão dos Resultados

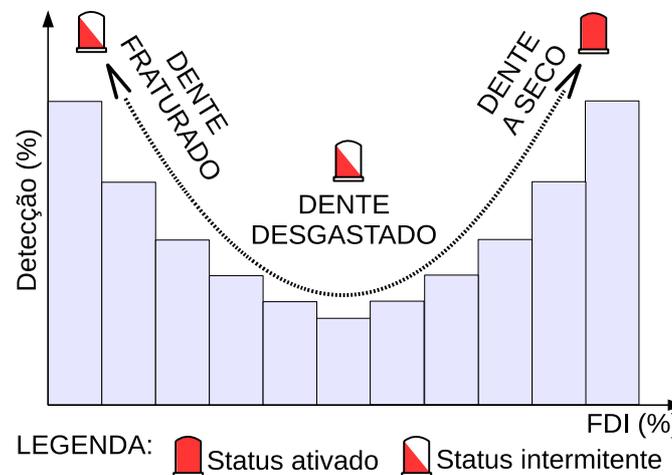
Os resultados apresentados neste capítulo demonstram, no escopo de tolerância a falhas, que a arquitetura proposta fornece uma boa percepção ao usuário dos problemas ocorridos no sistema.

Conforme as simulações realizadas, a evolução da falha no sistema, em decorrência do aumento do esforço envolvido na operação do atuador elétrico, pode ser facilmente acompanhada pela análise do histograma da Figura 6.33(a). Assim, a distribuição das barras desse gráfico localizada mais à esquerda, representa menos deterioração do equipamento. Já a distribuição localizada mais à direita, demonstra uma deterioração mais severa. Deste modo, com o deslocamento à direita do gráfico, a percepção do restante da vida útil do equipamento é compreendida pelo aumento do torque exercido na transmissão da haste para a gaveta da válvula e a força exercida pelo fluido.

Figura 6.32: Formas de diagnóstico extraído do histograma.



(a) Modo aproximação e sensor de torque.



(b) Modo detalhe e sensor de vibração.

O diagnóstico produzido no histograma da Figura 6.33(b), proveniente dos dados de vibração do sistema, é um pouco mais complexo. A distribuição das barras desse gráfico localizada mais à esquerda, representa falha nas engrenagens em decorrência de dentes fraturados. A distribuição centrada das barras, representa falha nas engrenagens em decorrência de dentes desgastados. Já a distribuição localizada mais à direita, uma deterioração com as engrenagens sem lubrificação.

Em ambos os gráficos mencionados anteriormente, em algum momento o sinal de *status* foi ativado durante os testes de injeção de falhas. Foi sinalizado de forma constante nos resultados mais à direita da distribuição das barras e de forma intermitente aos resultados mais à esquerda da distribuição das barras.

Outro ponto ressaltado pela metodologia proposta neste trabalho é na redução do consumo de energia pela utilização de circuitos integrados. Em uma empresa como a Petrobras, com milhares de válvulas sejam elétricas ou não, pode-se estimar que com o uso do FDS ocorreria uma vantagem significativa do ponto de vista do consumo de energia.

Para obter-se uma estimativa, levando em conta que as principais técnicas consideradas são baseadas nas plataformas de ASIC, FPGA ou PCs, o consumo será calculado.

Supondo uma pequena área da Transpetro, que contenha aproximadamente 50 atuadores funcionando com uma média de 15 ciclos de abertura e fechamento por dia, a energia (em  $Wh$ ) consumida é estimada na Tabela 6.9. Considerando que cada ciclo de abertura e fechamento da válvula demanda 2 minutos, isso representa um tempo de 750 horas mensais de consumo em funcionamento e 35.250 horas de consumo em espera.

Ao final de cada mês o consumo total para uma técnica utilizando ASIC seria de  $0,02 kWh$ , o consumo utilizando somente FPGA seria de  $14,03 kWh$  e o consumo utilizando computador PC seria de  $8.850 kWh$ . Conforme dados atualizados em (EUROSTAT, 2017) da energia elétrica na Europa, que podem ser obtidos pelo preço atual de energia em  $U\$/kWh$ , custa em média  $0,220 U\$/kWh$ . Então, para uma técnica, utilizando ASIC, o consumo de energia mensal seria de  $U\$ 5 \times 10^{-3}$ , utilizando somente FPGA seria de  $U\$ 3,09$  e, com computador PC de  $U\$ 1947$ .

Tabela 6.9: Comparativo de consumo aproximado de 50 válvulas para 15 ciclos diários.

Plataforma	Consumo para operar		Consumo parado		Total no mês	
	$W$	$Wh$	$W$	$Wh$	$kWh$	$U\$$
ASIC	$8,67 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-5}$	$6,45 \times 10^{-4}$	22,74	0,02	$5 \times 10^{-3}$
FPGA	0,04	33,64	0,40	13.996,72	14,03	3,09
PC	50,00	37.500,00	250,00	8.812.500,00	8.850,00	1947

Considerando o período de 12 meses, para uma técnica utilizando ASIC, o consumo de energia seria de  $U\$ 60 \times 10^{-3}$  e com computador PC um fator de 389214 maior, ou seja, de  $U\$ 23364,00$ . Em menos de um ano, só a economia do ponto de vista de consumo de energia cobre os investimentos com a aquisição desses equipamentos para manutenção. Conforme visto na seção 6.3.2, o custo de cada sistema composto por FPGA e microcontrolador com interface wireless, o investimento chegaria a  $U\$ 1250,00$  ( $U\$ 50,00 * 50$  dispositivos). A mesma análise do ponto de vista de investimento na aquisição de PCs por válvula, torna-se inviável.

Deste modo, na medida em que se extrapola o raciocínio para tempos maiores ou mesmo uma quantidade maior de atuadores, como uma refinaria inteira, a economia de energia e investimento podem ser bem consideráveis.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma metodologia para concepção de um circuito integrado aplicado à manutenção inteligente, visando ao diagnóstico e possível prognóstico de falhas como auxílio à tomada de decisão. Para alcançar uma melhor qualidade e produtividade do complexo de distribuição de petróleo e seus derivados, melhorando sua confiabilidade e disponibilidade, a metodologia foi concebida e validada em um equipamento crítico existente na operação da malha dutoviária de terminais. Trata-se do conjunto atuador-válvula como estudo de caso.

Para validar o *hardware* proposto utilizou-se uma bancada instrumentada. Foram realizados ensaios de esforços no atuador elétrico acoplado a um sistema de freio a disco e engrenagens defeituosas para a injeção de falhas de modo a replicar condições mais frequentes levantadas em campo. Em todos os experimentos, a falha injetada foi detectada com o bloco FDS e o seu diagnóstico produzido através de diferentes assinaturas de falha com o bloco FDI permitindo a construção de um histograma.

O sistema implementado opera em duas fases. Na primeira, através do FDS, é realizada a detecção instantânea da falha, ou seja, a percepção de que algo está errado e pode estar levando o processo a algum desvio mais significativo do seu funcionamento normal. Neste ponto ainda não se sabe a localização ou o motivo que ocasionou a falha.

Nesta fase, os testes demonstraram que o modelo constituído pelo filtro adaptativo, quando apresenta discrepâncias em comparação ao processo real, produz uma estimativa igualmente deficitária, seja nas condições dinâmicas ou estacionárias, produzindo a detecção correta das falhas. Isto pode ser concluído de acordo com os valores dos resíduos ou erros muito próximos a zero em funcionamento normal do processo. No momento que a falha ocorre, os resíduos refletem o comportamento esperado de falha nos testes.

A partir do sinal de saída do FDS, é possível monitorar variações dos parâmetros do processo físico com falhas abruptas, incipientes e intermitentes, o que corresponde às atividades de detecção e identificação. A etapa de diagnóstico, nessa fase, necessita de interpretações pela representatividade visual dos sinais de saída em modo de falha.

A segunda fase, através do FDI, é a identificação da falha. O diagnóstico é simplificado através de conclusões diretas indicadas em um histograma, que permite verificar o componente ou local físico dentro do sistema onde o problema detectado no passo anterior se encontra. Neste momento pode-se classificar as falhas.

O sistema é responsável pelo processamento das quatro primeiras camadas do

modelo OSA-CBM, ou seja, captura de dados e processamento inteligente (que inclui processamento de sinais, monitoração de condição e diagnóstico). Dessa forma, pode-se acompanhar o desenvolvimento de uma falha, evitando que a mesma surpreenda e cause danos mais expressivos. Considerando a quantificação das anormalidades detectadas e a localização física destas no processo, de maneira direta, esta técnica também pode ser útil para o prognóstico de falhas e da qualidade do processo.

A estrutura proposta composta pelo FDS e FDI é uma alternativa eficiente para se detectar falhas ocorrendo em um sistema. Destaca-se ainda que a estrutura apresentada possui a capacidade de aplicação em ambientes reais, considerando ruído. Como a solução proposta se baseia em um algoritmo de estimação do filtro para sinais estocásticos, uma consequência natural e direta é a capacidade de seu funcionamento mesmo diante da presença de ruídos de medição de processos.

O sistema pode ser implementado como um sequência de instruções executadas por um microprocessador de propósito geral ou mesmo embarcado em FPGA. De acordo com os resultados obtidos na implementação utilizando uma FPGA (seção 6.3) em conjunto com um microcontrolador de uso geral como interface de comunicação, o projeto apresenta-se viável também para a implementação em aplicações distribuídas (seção 5.5).

No entanto, objetivando circuitos de baixo consumo, com linguagem de *hardware*, pode ser implementado em um circuito integrado personalizado para a produção de um chip. Na elaboração de um leiaute físico foi abordado o escalonamento dinâmico de frequência e *clock gating*. Considerando a frequência mais baixa de operação de  $4\text{ kHz}$  para a biblioteca educacional de  $90\text{ nm}$ , os resultados demonstram após a síntese física a dissipação estática e dinâmica de  $654,37\ \mu\text{W}$  e  $26,61\ \text{nW}$ , respectivamente. Limitando-se ao caminho crítico pela comunicação serial da interface SPI, a frequência máxima de operação obtida foi de até  $168\ \text{MHz}$ . Com isso, pode-se dizer que o sistema apresenta potencial para processar grandes quantidades de dados em tempo real e baixo consumo de energia.

Finalmente, conforme abordado na seção 4.2.1, esse trabalho permite auxiliar na solução de um problema de impacto econômico e extremamente relevante na operação da movimentação de petróleo, que consiste em garantir a qualidade e continuidade do bombeio de petróleo e derivados em dutos para o suprimento de terminais e refinarias. Aliado a procedimentos tolerantes e redundantes, decisões podem ser tomadas em tempo de execução (*online*) antes que a linha de produção pare ou mesmo misture os diferentes subprodutos de petróleo utilizados.

## 7.1 CONTRIBUIÇÕES TÉCNICAS

O principal benefício e diferencial desse trabalho, comparado com outras abordagens relacionadas com o estudo de caso no suprimento de petróleo (seção 4.3.2), é a apresentação de uma solução nas primeiras camadas OSA-CBM totalmente embarcada em *hardware* que possa obter uma otimização de consumo de energia e operar em tempo real. As informações providas dessa solução também vêm enriquecer a forma como se monitora a saúde dos equipamentos nos processos industriais, permitindo uma análise facilitada do desempenho e das condições dos equipamentos para área da manutenção inteligente.

Dentre as contribuições observadas, pode-se destacar:

- Um projeto ASIC de um sistema de diagnóstico e detecção de falhas em tempo real aplicado a válvulas eletromecânicas;
- Descrição do circuito integrado em nível estrutural, sem utilizar outras descrições de *hardware*, esquemáticos, blocos de propriedade intelectual ou de terceiros;
- Baixo consumo de energia em decorrência das otimizações de *hardware*;
- A simplificação do circuito através de operações de deslocamento aritmético e processamento em ponto-fixa no formato Q;
- A degradação do equipamento pode ser monitorada pela frequência de detecção de falha e sua severidade pelo índice que corresponde à gravidade do efeito da falha;
- O sistema pode ser integrado a futuros modelos de fábrica 4.0, por meio do protocolo de comunicação industrial sem fio WirelessHART™;
- A visualização de sintomas que indicam a formação de uma falha incipiente, tais como a falta de lubrificação ou o simples desgaste de uma engrenagem;
- Simplificação do processo de diagnóstico, a partir de conclusões diretas indicadas pela representatividade de um histograma em modo de falha;
- Validação da proposta através de experimentos como o estudo de caso, onde se verifica a presença de ruídos de medição e de processo;
- A possibilidade de detectar a ocorrência de diferentes falhas, sejam abruptas, incipientes ou intermitentes, mesmo que ocorram simultaneamente;
- A importância de realizar tarefas de detecção e diagnóstico de falhas em tempo real de maneira *online*, viabilizando operações sob ótica da tolerância a falhas;
- A análise de desempenho com diversas ferramentas de síntese de um ASIC, que

de algum modo, satisfazem os requisitos requeridos de cada bloco da arquitetura proposta;

- A necessidade de conhecer o equipamento, o tipo certo de sensor e o seu devido posicionamento próximo a locais em que possam ocorrer as falhas.

## 7.2 TRABALHOS SUBMETIDOS OU PUBLICADOS

Foram publicados trabalhos completos em anais de eventos científicos, um artigo submetido para análise, dois capítulos de livro e um registro de *software*.

Inicialmente é apresentado os trabalhos publicados em anais de eventos:

- Leonardo B. Piccoli, Eduardo L. Schneider, Renato V. Henriques, Carlos E. Pereira. **Desenvolvimento de um Sistema Embarcado para Predição e Detecção de Falhas em Válvula de Transmissão de Petróleo e Derivados**. Em: Workshop em Sistemas Embarcados para a Indústria de Óleo, Gás e Energia - WES2012. Rio grande, RS, Brasil: [s.n.], 2012.
- Leonardo B. Piccoli, Eduardo L. Schneider, Renato V. Henriques, Carlos E. Pereira. **Predição e Detecção de Falhas em Atuadores Elétricos Através de um Sistema Embarcado**. Em: IV PCIC BR - Petroleum, Chemical Industry Technical Conference. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: [s.n.], 2012.
- Leonardo B. Piccoli, Renato V. Henriques, Carlos E. Pereira, Eduardo L. Schneider. **Uma Solução Embarcada para a Predição e Detecção de Falhas em Válvula de Transmissão de Petróleo e Derivados**. Em: XIX Congresso Brasileiro de Automação - CBA. Campina Grande, PB, Brasil: [s.n.], 2012.
- Leonardo B. Piccoli, Carlos S. Guimaraes, Renato Ventura B. Henriques, Carlos E. Pereira. **Proposal of an Embedded Distributed System for Fault Detection**. IFAC Proceedings Volumes, v. 46, n. 7, p. 144-149, 2013.
- Leonardo B. Piccoli, Carlos S. Guimarães Jr., Renato Ventura B. Henriques, Jean Michel Winter, Ivan Muller, João C. Netto, Carlos E. Pereira. **Embedded Fault Detection System Using WirelessHART Networks**. Em: Simpósio em Computação e Automação para Indústria Naval, Offshore e Subaquática - Navcomp. Rio grande, RS, Brasil: [s.n.], 2013.
- Edzel R. Lapira, Behrad Bagheri, Wenyu Zhao, Jay Lee, Renato VB Henriques, Carlos E. Pereira, Leonardo Piccoli, CSS Guimarães. **A systematic approach to**

**intelligent maintenance of production systems with a framework for embedded implementation.** IFAC Proceedings Volumes, v. 46, n. 7, p. 23 – 28, 2013.

Posteriormente são apresentados os capítulos de livro:

- Leonardo Piccoli, Renato Ventura Bayan Henriques, Eric Ericson Fabris, Eduardo Schneider, Carlos Pereira. **Embedded Systems Solutions for Fault Detection, Prediction in Electrical Valves.** Em: Engineering Asset Management. Cham: Springer International Publishing, 2015. cap. 1, p. 493–504. ISBN 9783319024615.
- Leonardo Piccoli, Renato Ventura Bayan Henriques, Clayton Rocha, Eric Ericson Fabris, Carlos Pereira. **Proposal of a Quality Index Applied to Fault Detection Method in Electrical Valves.** Em: Engineering Asset Management. Cham: Springer International Publishing, 2015. cap. 1, p. 401–412. ISBN 9783319095066.

Em seguida o registro de *software* efetivado:

- Carlos Eduardo, Leonardo Piccoli e Renato Ventura Bayan Henriques. **Fault Detection System.** 2016. 51 2016 000863-6080. Disponível em: <<http://www.inpi.gov.br>>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

Finalmente o artigo submetido para revista *Journal of Integrated Circuits, Systems.*

- Leonardo Piccoli, Eduardo Schneider, Renato V. Henriques, Tiago R. Balen. **Design of an On-Chip System for Real-Time Fault Detection, Diagnosis in Electro-mechanical Valves.** 2018.

### 7.3 TRABALHOS FUTUROS

Além das contribuições apresentadas, devido à heterogeneidade de áreas dentro do escopo deste estudo, a proposta pode receber outras melhorias e adaptações para possíveis trabalhos futuros. Para que haja também uma quantidade maior de informações é necessário que as abordagens deste trabalho sejam ampliadas para outras aplicações. A seguir, alguns estudos que ficarão para serem desenvolvidos posteriormente à apresentação desta tese:

- Mesmo que o objeto principal seja a predição e diagnóstico de falhas em equipamentos, o sistema pode ser adaptado para tomar decisões com base em mecanismos de tolerância a falhas (seção 4.2.1);

- Integração com ferramentas (BOUSDEKIS et al., 2018) voltadas ao prognóstico e gerenciamento das falhas no equipamento;
- Adaptação da proposta com redundância de informações em uma rede de sensores, visando adicionar a detecção, diagnóstico e correção de falha nos transdutores;
- Verificação da integridade dos dados transmitidos utilizando os 2 *bits* reservados do protocolo (seção 5.6.1);
- Estudo do aumento da quantidade de sensores (FACCIN, 2011) e a identificação dos locais adequados para a sua instalação (mais próximo a uma engrenagem ou rolamento);
- Execução do aumento da precisão do cálculo realizado de 16 *bits* do algoritmo embarcado no ASIC. Essa quantidade foi definida em virtude da resolução do conversor A/D de 12 *bits* utilizado;
- Possibilidade de implementação do algoritmo com base em uma interface padrão para sensor inteligente (LEE, 1998), permitindo maior escalabilidade do sistema pela conexão em rede facilitada;
- Exploração de outras maneiras de falha que possam ser analisadas e adicionadas a este estudo;
- A existência de uma base de dados da **avaliação da saúde**, à medida que for grande o suficiente, fará com que o prognóstico da vida útil restante de um equipamento seja realizado adicionando outras técnicas (ex.: modelos ARMA (STEIN, 2014));
- Realização de ensaios de compatibilidade eletromagnética (EMC - *Electromagnetic Compatibility*) para validar o sistema implementado através de uma FPGA e um microcontrolador. Esses ensaios visam verificar a susceptibilidade do sistema proposto à interferência eletromagnética (EMI - *Electromagnetic interference*), ou seja, qual é a sua capacidade em detectar e diagnosticar falhas quando operando em um ambiente de alto ruído eletromagnético.

Finalmente, sugere-se, com base na experiência na elaboração de um ASIC desse trabalho, que este tipo de técnica possa ser fabricada industrialmente.

## REFERÊNCIAS

- AFFONSO, L. O. A. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. 2. ed. [S.l.]: QUALITYMARK, 2006. 336 p. ISBN 9788573036343.
- ANP. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. 2018. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.
- ARCHITECTURES, R. L.; PRACTICES, D. CompactRIO Developers Guide. **System**, National Instruments, December 2009.
- ARRIOLA, D.; THIELECKE, F. Model-based design and experimental verification of a monitoring concept for an active-active electromechanical aileron actuation system. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 94, n. Supplement C, p. 322–345, 2017. ISSN 0888-3270.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.
- AVIZIENIS, A. Toward Systematic Design of Fault-Tolerant Systems. **IEEE Computer**, v. 30, n. 4, p. 51–58, 1997.
- BALEN, T.; LUBASZEWSKI, M. Teste e Projeto Visando a Testabilidade de Circuitos e Sistemas Integrados. In: \_\_\_\_\_. **Tópicos em Micro e Nano Eletrônica**. 1. ed. Ijuí/RS: Editora Unijui, 2014. v. 1, cap. 8, p. 219–264. ISBN 978-85-419-0010-9.
- BARUA, S. et al. An efficient architecture for lifting-based two-dimensional discrete wavelet transforms. **Integration**, v. 38, n. 3, p. 341–352, 2005. ISSN 0167-9260. ACM Great Lakes Symposium on VLSI.
- BEGG, C. D.; BYINGTON, C. S.; MAYNARD, K. P. Dynamic simulation of mechanical fault transition. In: **54th meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology**. Virginia Beach, VA: Society for Machinery Failure Prevention Technology, 2000. p. 203–212.
- BEZERRA, E. A.; VARGAS, F.; GOUGH, M. P. Improving reconfigurable systems reliability by combining periodical test and redundancy techniques: A case study. **Journal of Electronic Testing**, v. 17, n. 2, p. 163–174, Apr 2001.
- BHATNAGAR, H. **Advanced ASIC Chip Synthesis: Using Synopsys' Design Compiler and PrimeTime**. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2002. ISBN 978-0-306-47507-8.
- BÖESCH, K. **Detecção de falhas por fusão de sensores em atuadores elétricos. Correlação entre sinais de torque e vibração**. Dissertação (Trabalho de diplomação) — Departamento de Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- BOROUJENY, F. B. **Adaptive Filters: Theory and Applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, UK, 1998.

BOSA, J. L. **Sistema Embarcado para a Manutenção Inteligente de Atuadores Elétricos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Informática, Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre, 2009.

BOUSDEKIS, A. et al. Enabling condition-based maintenance decisions with proactive event-driven computing. **Computers in Industry**, v. 100, p. 173 – 183, 2018. ISSN 0166-3615.

BOYES, H. et al. The industrial internet of things (iiot): An analysis framework. **Computers in Industry**, v. 101, p. 1 – 12, 2018. ISSN 0166-3615.

CEITEC. **Centro de Excelência em Tecnologia Eletrônica Avançada**. 2018. Disponível em: <<http://www.ceitec-sa.com>>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

CHEN, H.; CHUA, P. S.; LIM, G. Adaptive wavelet transform for vibration signal modelling and application in fault diagnosis of water hydraulic motor. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 8, p. 2022–2045, 2006. ISSN 0888-3270.

CHILLAREGE, R.; BOWEN, N. S. Understanding large system failures-a fault injection experiment. In: [1989] **The Nineteenth International Symposium on Fault-Tolerant Computing. Digest of Papers**. [S.l.: s.n.], 1989. p. 356–363.

CHOLETTE, M. E. et al. Condition Monitoring and Operational Decision Making in Semiconductor Manufacturing. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing**, v. 26, n. 4, p. 454–464, Nov 2013.

CLARK, J. A.; PRADHAN, D. K. Fault Injection: A Method for Validating Computer-System Dependability. **IEEE Computer**, v. 28, n. 6, p. 47–56, 1995.

COESTER. **Coester Automação Ltda**. 2018. Disponível em: <<http://www.coester.com.br/br/produtos/detalhes/14>>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

COESTER AUTOMAÇÃO. **Coester Automação, Manual Atuador - Linha CSR CSR 12- CSR 25 - CSR 50 Integral**. [S.l.], 2001.

CONSERVATION, A. D. of E. **Aboveground Storage Tank Operator Handbook**. 3. ed. Alaska, US: State of Alaska, 2016.

DAUBECHIES, I.; SWELDENS, W. Factoring Wavelet Transforms into Lifting Steps. **Journal of Fourier Analysis and Applications**, v. 4, n. 3, p. 245–267, 1998.

DEVI, S.; SARAVANAN, M. An innovative modular device and wireless control system enabling thermal and pressure sensors using FPGA on real-time fault diagnostics of steam turbine functional deterioration. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 102, n. Supplement C, p. 312–328, 2018. ISSN 0888-3270.

DINIZ, P. S. R. **Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation**. 4. ed. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2013. ISBN 9781461441069.

DJURDJANOVIC, D.; LEE, J.; NI, J. Watchdog agent - an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction. **Advanced Engineering Informatics**, v. 17, n. 3-4, p. 109–125, 2003.

DUAN, L. et al. Segmented infrared image analysis for rotating machinery fault diagnosis. **Infrared Physics & Technology**, v. 77, p. 267–276, 2016.

Carlos Eduardo, Leonardo Piccoli e Renato Ventura Bayan Henriques. **Fault Detection System**. 2016. 51 2016 000863-6080. Disponível em: <<http://www.inpi.gov.br>>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

EUROSTAT. **Electricity price statistics**. 2017. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity\\_price\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics)>. Acesso em: 22 de dezembro de 2017.

FACCIN, F. C. **Manutenção Inteligente: Fusão de sensores aplicada na detecção de falhas em atuadores elétricos**. Dissertação (Trabalho de diplomação) — Departamento de Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FONTAINE, M. D. et al. Ieee / esw applying reliability centered maintenance (rcm) to electrical equipment critical to worker safety. In: **2013 IEEE IAS Electrical Safety Workshop**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 105–112. ISSN 2326-330X.

GAN, W.-S.; KUO, S. M. **Embedded Signal Processing with the Micro Signal Architecture**. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2007. ISBN 0471738417.

GAO, Z.; CECATI, C.; DING, S. X. A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques - Part I: Fault Diagnosis With Model-Based and Signal-Based Approaches. **IEEE Trans. Industrial Electronics**, v. 62, n. 6, p. 3757–3767, 2015.

GIACOMOLLI, A. A. **Proposta de Arquitetura Orientada a Serviços para um Sistema de Manutenção Inteligente**. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Departamento de Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

GOLDMAN, R. et al. Synopsys' open educational design kit: Capabilities, deployment and future. In: **IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education, MSE '09, San Francisco, CA, USA, July 25-27, 2009**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 20–24.

GONÇALVES, L. F. et al. Fault Detection, Diagnosis and Prediction in Electrical Valves Using Self-Organizing Maps. **J. Electron. Test.**, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, v. 27, n. 4, p. 551–564, ago. 2011. ISSN 0923-8174.

HAYKIN, S. **Adaptive Filter Theory**. 4. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2001. Hardcover. ISBN 0130901261.

HENRIQUES, R. V. B. et al. Detecção de Falhas em atuadores nas linhas de transporte de petróleo e/ou derivados. In: **ANAIS DO BRAZIL AUTOMATION ISA 2010. 14th Congresso Internacional e Exposição Sul-Americana de Automação, Sistemas e Instrumentação**. São Paulo, Brasil, 2010.

HOFMANN, E.; RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, v. 89, p. 23 – 34, 2017. ISSN 0166-3615.

HSUEH, M.-C.; TSAI, T. K.; IYER, R. K. Fault Injection Techniques and Tools. **IEEE Computer**, v. 30, n. 4, p. 75–82, 1997.

HU, G. et al. A deep boltzmann machine and multi-grained scanning forest ensemble collaborative method and its application to industrial fault diagnosis. **Computers in Industry**, v. 100, p. 287 – 296, 2018. ISSN 0166-3615.

JIAN, H. et al. Optimization of a pressure control valve for high power automatic transmission considering stability. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 101, n. Supplement C, p. 182–196, 2018. ISSN 0888-3270.

JOHNSTON, A. T.; WONG, P. **Open System Architecture for Condition-Based Maintenance**. An Operations and Maintenance Information Open System Alliance, 2018. Disponível em: <[www.mimosa.org/mimosa-osa-cbm](http://www.mimosa.org/mimosa-osa-cbm)>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

JOU, J. M.; SHIAU, Y.-H.; LIU, C.-C. Efficient VLSI Architectures for The Biorthogonal Wavelet Transform by Filter Bank and Lifting Scheme. *Circuits and Systems*, 2001. ISCAS 2001. The 2001 IEEE International Symposium on, p. vol.2, pp.529–532, 2001.

KHAN, Y. Power Optimization of Linear Feedback Shift Register Using Clock Gating. **International Journal of Electronics and Communication Technology (IJECT)**, v. 4, p. 109–115, 2013.

KONEZNY, M.; RAO, S. Improving the DWT-LMS algorithm: boundary filter DWT matrix construction. In: **Signals, Systems and Computers, 1995. 1995 Conference Record of the Twenty-Ninth Asilomar Conference on**. [S.l.: s.n.], 1995. v. 1, p. 75–81 vol.1.

LAPRIE, J. C. DEPENDABLE COMPUTING AND FAULT TOLERANCE : CONCEPTS AND TERMINOLOGY. In: **Fault-Tolerant Computing, 1995, Highlights from Twenty-Five Years., Twenty-Fifth International Symposium on**. [S.l.: s.n.], 1995. p. 2–.

LAZZARETTI, E. P. **Avaliação de Desempenho de Implementações em Hardware e Software de Algoritmos para Aplicações de Manutenção Inteligente**. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Departamento de Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LEE, J. Measurement of machine performance degradation using a neural network model. **Comput. Ind.**, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 30, n. 3, p. 193–209, out. 1996. ISSN 0166-3615.

LEE, J. E-manufacturing-fundamental, tools and transformation. In: LSEVIER (Ed.). **Pointlike structures inside and outside hadrons**. Milwaukee, WI, USA: Science Direct, 2003. p. 501–507.

LEE, K. IEEE Standard for a smart transducer interface for sensors and actuators - transducer to microprocessor communication protocols and transducer electronic data sheet (TEDS) formats. **IEEE Std 1451.2-1997**, 1998.

- LO, C. H.; WONG, Y.-K.; RAD, A. B. Intelligent system for process supervision and fault diagnosis in dynamic physical systems. **IEEE Trans. Industrial Electronics**, v. 53, n. 2, p. 581–592, 2006.
- MAHESWARI, R. U.; UMAMAHESWARI, R. Trends in non-stationary signal processing techniques applied to vibration analysis of wind turbine drive train – A contemporary survey. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 85, n. Supplement C, p. 296–311, 2017. ISSN 0888-3270.
- MALCOLM, N.; ZHAO, W. The Timed-Token Protocol for Real-Time Communications. **IEEE Computer**, v. 27, n. 1, p. 35–41, 1994.
- MANSOURI, M. et al. Wavelet optimized EWMA for fault detection and application to photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 167, p. 125–136, 2018. ISSN 0038-092X.
- MARÇAL, R.; SUSIN, A. Detecting Incipient Faults in Rotating Machines. **Revista Gestão Industrial**, p. 83–92, 2005. ISSN 1808-0448.
- MARIMON, G. C. **Fusão de Sensores Aplicada à Manutenção Inteligente**. Dissertação (Trabalho de diplomação) — Departamento de Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- MARTINEZ-ORTIZ, C.; BECK, M.; WILDE, P. D. Ewma based approaches for automated building energy analysis. In: **2011 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 562–566. ISSN 2162-7843.
- MENTOR GRAPHICS CORPORATION. **Modelsim SE Reference Manual 6.3f**. [S.l.], 2008. Disponível em: <[www.mentor.com/products/fv/modelsim](http://www.mentor.com/products/fv/modelsim)>. Acesso em: 03 de agosto de 2015.
- MIKHAYLOV, K.; PETAEJAEJAERVI, . J.; HAENNINEN, T. Analysis of capacity and scalability of the lora low power wide area network technology. In: **European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- MIREMADI, G.; TORIN, J. Evaluating processor-behavior and three error-detection mechanisms using physical fault-injection. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 44, n. 3, p. 441–454, Sep 1995. ISSN 0018-9529.
- NAGAR, S. **Introduction to Scilab: For Engineers and Scientists**. 1st. ed. Berkely, CA, USA: Apress, 2017.
- NEGREIROS, M. **Filtros adaptativos aplicados à separação de sinais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalurgica e dos Materiais, Porto Alegre, 1994.
- PANDYA, M.; MALEK, M. Minimum Achievable Utilization for Fault-Tolerant Processing of Periodic Tasks. **IEEE Trans. Computers**, v. 47, n. 10, p. 1102–1112, 1998.
- PETROBRAS. **Petróleo Brasileiro S.A.** 2018. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br>>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

PICCOLI, L. et al. Embedded Systems Solutions for Fault Detection and Prediction in Electrical Valves. In: **Engineering Asset Management**. Cham: Springer International Publishing, 2015. cap. 1, p. 493–504. ISBN 9783319024615.

PICCOLI, L. et al. Proposal of a Quality Index Applied to Fault Detection Method in Electrical Valves. In: **Engineering Asset Management**. Cham: Springer International Publishing, 2015. cap. 1, p. 401–412. ISBN 9783319095066.

PICCOLI, L. B. et al. Proposal of an Embedded Distributed System for Fault Detection. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, n. 7, p. 144–149, 2013. ISSN 1474-6670.

PICCOLI, L. B. et al. Embedded Fault Detection System Using *Wireless*HART Networks. In: **Simpósio em Computação e Automação para Indústria Naval, Offshore e Subaquática - Navcomp**. Rio grande, RS, Brasil: [s.n.], 2013.

PICCOLI, L. B. et al. Desenvolvimento de um Sistema Embarcado para Predição e Detecção de Falhas em Válvula de Transmissão de Petróleo e Derivados. In: **Workshop em Sistemas Embarcados para a Indústria de Óleo, Gás e Energia - WES2012**. Rio grande, RS, Brasil: [s.n.], 2012.

PLONKA, G.; STRELA, V. Construction of multiscaling functions with approximation and symmetry. **SIAM Journal on Mathematical Analysis**, v. 29, n. 2, p. 481–510, 1998.

Qiu, H. et al. Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics. **Journal of Sound Vibration**, v. 289, p. 1066–1090, fev. 2006.

RAI, A.; UPADHYAY, S. Bearing performance degradation assessment based on a combination of empirical mode decomposition and k-medoids clustering. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 93, n. Supplement C, p. 16–29, 2017. ISSN 0888-3270.

RAMAMRITHAM, K.; STANKOVIC, J. A. Scheduling algorithms and operating systems support for real-time systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 82, n. 1, p. 55–67, Jan 1994. ISSN 0018-9219.

RASTEGARI, A.; ARCHENTI, A.; MOBIN, M. Condition based maintenance of machine tools: Vibration monitoring of spindle units. In: **2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

ROCHA, C. G. M. **Análise da Variabilidade de Vibração em Atuadores Elétricos**. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Departamento de Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RUSSO, E. E. R. e. a. **A Realidade Virtual na Indústria de Exploração e Produção de Petróleo**. [S.l.]: Editora Mania de Livro. São Paulo, SP: Realidade Virtual: Conceitos e Tendências, 2004. 283–288 p.

SCHUCK, A. **Análise e processamento de sinais de voz disfônica através da transformada wavelet discreta**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, 1998.

SERVICES, A. W. **Shop HiLetgo**. 2018. Disponível em: <<https://www.amazon.com/l/HiLetgo>>. Acesso em: 01 de setembro de 2018.

SHAHBAZI, M.; POURE, P.; SAADATE, S. Real-time power switch fault diagnosis and fault-tolerant operation in a DFIG-based wind energy system. **Renewable Energy**, v. 116, n. Part B, p. 209–218, 2018. ISSN 0960-1481.

SHAO, H. et al. Rolling bearing fault detection using continuous deep belief network with locally linear embedding. **Computers in Industry**, v. 96, p. 27 – 39, 2018. ISSN 0166-3615.

SHAO, H. et al. A novel deep autoencoder feature learning method for rotating machinery fault diagnosis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 95, n. Supplement C, p. 187–204, 2017. ISSN 0888-3270.

SHIN, K. G.; RAMANATHAN, P. Real-time computing: a new discipline of computer science and engineering. **Proceedings of the IEEE**, v. 82, n. 1, p. 6–24, Jan 1994. ISSN 0018-9219.

SOBIE, C.; FREITAS, C.; NICOLAI, M. Simulation-driven machine learning: Bearing fault classification. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 99, n. Supplement C, p. 403–419, 2018. ISSN 0888-3270.

STEIN, F. da S. **Desenvolvimento de Módulo de Predição de Comportamento para Manutenção Inteligente de Atuador Elétrico**. Dissertação (Trabalho de diplomação) — Departamento de Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SUMATHI, S.; SUREKHA, P. **LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems**. [S.l.]: Springer Verlag, 2007. 728 p.

SWEARINGEN, K. et al. An Open System Architecture for Condition Based Maintenance Overview. In: **Aerospace Conference, 2007 IEEE**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–8. ISSN 1095-323X.

TAUBMAN, D. S.; MARCELLIN, M. W. JPEG2000: standard for interactive imaging. **Proceedings of the IEEE**, v. 90, n. 8, p. 1336–1357, 8 2002. ISSN 0018-9219.

TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. **First generation TMS320 user's guide**. [S.l.]: Texas Instruments ; Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1988. ISBN 2868860249.

TRANSPETRO. **Petrobras Transporte S.A.** 2018. Disponível em: <[www.transpetro.com.br](http://www.transpetro.com.br)>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

TUMBUSH, G. Signed arithmetic in verilog 2001 - opportunities and hazards. In: . San José, CA, US: Design and Verification Conference and Exhibition, 2005.

VALINS, T. F. **Relé digital de distância baseado na teoria de ondas viajantes e transformada Wavelet**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Engenharia Elétrica., Porto Alegre, 2004.

WALNUT, D. F. **An introduction to wavelet analysis**. [S.l.]: Birkhäuser Basel, 2002. (Applied and Numerical Harmonic Analysis). ISBN 9780817639624.

WANG, L.; GAO, R. X. **Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing (Springer Series in Advanced Manufacturing)**. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2006. ISBN 1846282683.

WANG, X. et al. Fault diagnosis of diesel engine based on adaptive wavelet packets and EEMD-fractal dimension. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 41, n. 1, p. 581–597, 2013. ISSN 0888-3270.

WIDROW, B.; STEARNS, S. D. **Adaptive Signal Processing**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.

X-FAB. **Analog/Mixed-Signal Semiconductor Foundry**. 2018. Disponível em: <<https://www.xfab.com/technology/cmos/06-um-xc06/>>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

YUAN, J. et al. Weak fault detection and health degradation monitoring using customized standard multiwavelets. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 94, n. Supplement C, p. 384–399, 2017. ISSN 0888-3270.

ZAKRAJSEK, J. J.; LEWICKI, D. G. Detecting gear tooth fatigue cracks in advance of complete fracture. **Tribotest**, v. 4, n. 4, p. 407–422, 6 1998.

ZHANG, X. et al. An improved AE detection method of rail defect based on multi-level ANC with VSS-LMS. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 99, n. Supplement C, p. 420–433, 2018. ISSN 0888-3270.