



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**TRANSFORMADAS DE WAVELETS E LÓGICA FUZZY
NA INSPEÇÃO POR EDDY-CURRENT EM TUBOS DE
GERADORES DE VAPOR DE CENTRAIS NUCLEARES**

LUIZ ANTONIO NEGRO MARTIN LOPEZ

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

**Orientador:
Dr. Daniel Kao SunTing**

**São Paulo
2002**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**TRANSFORMADAS DE WAVELETS E LÓGICA FUZZY
NA INSPEÇÃO POR EDDY-CURRENT EM TUBOS DE
GERADORES DE VAPOR DE CENTRAIS NUCLEARES**

LUIZ ANTONIO NEGRO MARTIN LOPEZ



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

Orientador:
Dr. Daniel Kao Sun Ting

SÃO PAULO
2002

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. *Daniel Kao Sun Ting* pela orientação ao longo do trabalho.
- Ao Centro Universitário UniFEI pelo apoio oferecido.
- Ao Sr. *Oswaldo Pereira Negrão Jr.*, da Interativa – Manutenção Preditiva Ltda., à Brasitest S. A. e à ABENDE pela colaboração prestada.
- Aos alunos de Iniciação Científica do UniFEI *Marcelo Araújo de Campos* e *Celso Fernando Mazaro* pela contribuição acadêmica.
- Ao Prof. Dr. *Belle R. Upadhyaya*, mentor do tema desta tese e principal pesquisador da Universidade do Tennessee, Knoxville - UTK, no projeto de parceria entre a UTK, patrocinada pela National Science Foundation e o IPEN, patrocinado pelo CNPQ no projeto “Sistemas de Monitoração e Diagnóstico Utilizando Métodos Avançados de Processamento de Informação”.
- À International Atomic Energy Agency, pelos recursos materiais de hardware fornecidos.

TRANSFORMADAS DE WAVELETS E LÓGICA FUZZY NA INSPEÇÃO POR EDDY-CURRENT EM TUBOS DE GERADORES DE VAPOR DE CENTRAIS NUCLEARES

Luiz Antonio Negro Martin Lopez

RESUMO

Os Geradores de Vapor de todo o mundo têm apresentado falhas precoces nos feixes tubulares, causadas tanto por erros de projeto como por operação inadequada que, além de comprometerem a disponibilidade e a segurança das usinas nucleares, também provocam grandes despesas. Para monitorar a condição operacional dos Geradores de Vapor, a inspeção do feixe tubular pelo ensaio não destrutivo das correntes parasitas ou Eddy-Current é a técnica utilizada para a localização e o dimensionamento de defeitos nos tubos. A inspeção é feita por meio de sondas dotadas de bobinas que são introduzidas nos tubos gerando sinais de corrente. Os sinais dos defeitos, na forma de gráficos das componentes da resistência e da reatância, que ao serem combinados geram figuras de Lissajous no plano complexo, contêm ruídos e a subjetividade da análise feita por inspetores compromete o diagnóstico. É comum dois inspetores emitirem opiniões diferentes para o mesmo sinal. Este trabalho tem como objetivo oferecer uma metodologia de análise de sinais que auxilie o inspetor na difícil tarefa de interpretar os sinais de Eddy-Current. É proposta uma metodologia para a remoção dos ruídos baseada em Transformadas de Wavelets. São propostos também, uma padronização da medida do ângulo de fase do sinal e a utilização de duas novas características representativas do defeito que são as amplitudes e as aberturas das pétalas das figuras de Lissajous. Além disso, demonstra-se que a utilização de um sistema de decisão baseado em lógica Fuzzy é viável. Os defeitos estudados neste trabalho são aqueles que resultam em perda volumétrica de material. Para testar a metodologia proposta, foram produzidos diversos tipos de defeitos artificiais em diversos tubos de latão, inox 316L e Inconel 600 com o objetivo de gerar dados experimentais controlados por meio de inspeções realizadas com aparelhos tais como o MIZ-17ET. Foram analisados cerca de 1000 sinais de defeitos que foram adquiridos através do programa LabVIEW, foram lidos e visualizados por meio de um Módulo de Leitura e Visualização de Sinais (MLV) concebido em MATLAB com essa finalidade. Os sinais foram

pré-processados por meio de Transformadas de Wavelets para a remoção do Ruído de Aquisição do Sinal, do Ruído do Material e do efeito “Lift-off” e são apresentados resultados que comprovam a viabilidade do método proposto. Foram extraídas características usuais dos sinais bem como as novas características propostas, por meio de um Programa de Processamento de Sinais (PPS) também concebido em MATLAB. Os resultados da pesquisa das características extraídas dos sinais permitiu determinar as relações entre os sinais e os defeitos que foram utilizadas em um sistema Fuzzy de auxílio à decisão. Toda a metodologia foi testada para os arquivos de sinais adquiridos e os resultados do sistema Fuzzy são apresentados para os sinais dos defeitos dos tubos de Inconel 600 e de aço inoxidável 316L. Os resultados obtidos permitem concluir que a metodologia proposta é viável.

WAVELETS TRANSFORMS AND FUZZY LOGIC IN THE EDDY-CURRENT INSPECTION OF NUCLEAR POWER PLANTS STEAM GENERATOR TUBES

Luiz Antonio Negro Martin Lopez

ABSTRACT

Nuclear power plants steam generators around the world have presented early damage history in their tubes, caused either by design errors or by inappropriate operation, which besides reducing the availability and the safety of the nuclear power plants it also generates heavy economical burden. To monitor the steam generators operational condition, the Eddy Current testing of their tubes is the non destructive method used to detect, localize, classify and to size the defects. The inspection is performed by inserting probes with coils in the tubes generating a signal correlated to the defect. These signals produced by the probe electric circuit are composed by the resistance and the inductive components which can be combined to produce a Lissajous figure in the complex plane. However, Eddy-Current signals contain noise which induce subjectivity inducing to errors in the inspector diagnosis. It is not uncommon to have different diagnosis from two inspectors about the same signal. The present work has the objective of supplying a methodology to analyze the signals which could help the inspector in the difficult task of interpreting the Eddy Current signals. It is proposed a method to remove the noise based on Wavelets Transforms. It is also proposed a normalization in the signal phase angle measurements. Furthermore, two additional characteristics are also studied, namely: the signal amplitudes and the widths of the Lissajous petals. The use of a Fuzzy Logic based inference engine is also developed and its use is demonstrated to be viable. The defects studied in this work are those which produces volumetric changes in the material. In order to test the proposed methodology, several artificial defects were produced in tubes using different types of materials like: brass, 316L stainless steel and Inconel 600 to produce a experimental data base. An Eddy-Current inspection equipment, the MIZ-17ET was used. Around 1000 time series signals of defects were acquired through the LABVIEW program which were read by the Reading and Visualization Signals Module (MLV) of a program developed in MATLAB platform. These

signals were pre processed by Wavelets Transforms to remove Data Acquisition Noise, Material Noise and Lift-off effect and the denoised signal shows that the method is appropriate. A Feature Extraction Module (PPS) was also developed under a MATLAB environment to generate the proper characteristics. The signals characteristics obtained by this module are then correlated with defects and used as inputs to a Fuzzy Logic based inference engine to help in the diagnosis. The entire methodology was tested using the Inconel 600 and 316L stainless steel tubes with defects data base. The results show that the proposed methodology is viable.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Histórico	2
1.2 A integridade dos feixes tubulares dos Geradores de Vapor	8
2. INSPEÇÕES DO FEIXE TUBULAR	11
2.1 Inspeção Visual	12
2.2 Partículas Magnéticas	13
2.3 Líquido Penetrante	14
2.4 Ultra-som	14
2.5 Radiografia	15
2.6 Emissão Acústica	15
3. INSPEÇÃO POR MEIO DE CORRENTES PARASITAS	16
3.1 O princípio da inspeção por Eddy-Current	16
3.2 Variação da distância tubo-sonda	22
3.3 Sondas de Eddy-Current	22
3.3.1 As bobinas das sondas	25
3.4 Frequência de inspeção	26
3.5 Frequência de amostragem e velocidade de inspeção	33
3.6 Calibração em inspeções por Eddy-Current	37
4. O ESTADO DA ARTE NA LOCALIZAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE DEFEITOS EM TUBOS	40

5	GERAÇÃO, AQUISIÇÃO E VISUALIZAÇÃO DE SINAIS EM INSPEÇÕES POR EDDY-CURRENT	45
5.1	Aparelhos utilizados	46
5.2	Tubos experimentais fabricados	49
5.2.1	Tubos de latão almirantado	50
5.2.1.1	Tubo LataoASME01	50
5.2.1.2	Tubo LataoASME02	50
5.2.1.3	Tubo LataoASME03	50
5.2.1.4	Tubo LataoASME04	51
5.2.1.5	Tubo LataoDid01	51
5.2.1.6	Tubo LataoDid02	52
5.2.1.7	Tubo LataoDid03	52
5.2.1.8	Tubo LataoDid04	54
5.2.2	Tubos de aço inoxidável	54
5.2.2.1	Tubo InoxASME01	54
5.2.2.2	Tubo InoxASME02	54
5.2.2.3	Tubo InoxASME03	55
5.2.2.4	Tubo InoxDid01	55
5.2.2.5	Tubo InoxDid02	56
5.2.2.6	Tubo InoxDid03	57
5.2.2.7	Tubos InoxTroc 01 a 06	58
5.3	Arquivos de sinais	59
5.4	Leitura e visualização de sinais	62
6	PRÉ-PROCESSAMENTO DE SINAIS DE EDDY-CURRENT	68
6.1	Transformadas de Fourier	68
6.2	Transformada de Fourier de Tempo Curto	69
6.3	Transformada de Wavelet	71
6.3.1	Função Wavelet Haar	75
6.3.2	Função Wavelet Daubechies	76
6.3.3	Função Wavelet Morlet	77
6.3.4	Função Wavelet Biortogonal	78
6.3.5	Função Wavelet Chapéu Mexicano	79

6.4 Remoção do ruído por meio de Transformadas de Wavelets	80
6.4.1 Remoção do Ruído de Aquisição do Sinal	80
6.4.1.1 Remoção do RAS do Defeito B do tubo LataoASME01	84
6.4.1.2 Remoção do RAS do Defeito C do tubo LataoASME01	85
6.4.1.3 Remoção do RAS do Defeito H do tubo LataoASME01	86
6.4.1.4 Remoção do RAS do Defeito G do tubo LataoASME01	86
6.4.1.5 Remoção do RAS do Defeito A do tubo LataoDid04	87
6.4.1.6 Remoção do RAS do Defeito F do tubo InoxDid03 (Inconel 600)	88
6.4.1.7 Conclusões sobre a remoção do RAS	89
6.4.2 Remoção do Ruído do Material	90
6.4.2.1 Remoção do RMT para o tubo InoxDid02	92
6.4.2.2 Remoção do RMT para o tubo InoxDid01	97
6.4.2.3 Conclusões sobre a técnica de remoção do RMT	104
6.4.3 Remoção do efeito “Lift-off” por meio de Transformadas de Wavelets ..	107
 7 PROCESSAMENTO DE SINAIS E SISTEMA FUZZY	109
7.1 Lógica Fuzzy	110
7.1.1 Variáveis lingüísticas e variáveis numéricas	111
7.1.2 Algoritmos nebulosos	111
7.1.3 Carac. de relações complexas por meio de algoritmos nebulosos	112
7.1.4 Sumário de propriedades relevantes dos conjuntos nebulosos	112
7.1.4.1 Notação e terminologia	112
7.1.4.2 Relações nebulosas	114
7.1.4.3 Operações com Conjuntos Nebulosos	114
7.1.4.4 Linguagem e Significado	115
7.1.4.5 Sistema Especialista Fuzzy	116
7.2 Programa de Processamento de Sinais de Eddy-Current	117
7.2.1 Módulo de Entrada de Dados	118
7.2.2 Módulo de Detecção e Contagem de Defeitos (MDC)	118
7.2.3 Módulo de Seleção do Defeito para Análise (MSA)	124
7.2.4 Módulo de Exibição de Sinais (MEX)	124
7.2.5 Módulo de Extração de Características do Sinal (MAC)	126

7.2.5.1	Leitura do ângulo de fase	127
7.2.5.2	Leitura das amplitudes parciais Ap1 e Ap2	131
7.2.5.3	Leitura das aberturas Ab1 e Ab2	132
7.2.5.4	Leitura da trajetória do sinal	134
7.2.6	Módulo de seleção da escala da figura de Lissajous (MSE)	137
7.3	Base de Conhecimento do Sistema Especialista Fuzzy	137
7.3.1	Defeitos circunferenciais	138
7.3.1.1	Entalhe circunferencial externo, simétrico e concêntrico	139
7.3.1.2	Entalhe circunf. externo, assimétrico, concêntrico ou excêntrico	146
7.3.1.3	Entalhe circunf. externo, simétrico, excêntrico e de grande extensão	152
7.3.2	Furos	153
7.3.2.1	Furo passante	154
7.3.2.2	Furo não passante	154
7.3.3	Entalhes oblongos longitudinais de grande extensão	159
7.3.4	Conclusões sobre a Base de Conhecimento do Sistema Fuzzy	161
7.4	Entradas do Sistema Fuzzy e nebulização	162
7.5	Conjunto de Regras	163
7.6	Seleção e Avaliação das Regras	170
7.7	Saídas do Sistema	170
7.8	Agregação	171
7.9	Desnebulização e decisão quanto à classificação e dimensionamento	172
7.10	Verificação Metodológica	172
7.11	Resultados da aplicação do Sistema Fuzzy ao tubo de Inconel 600	175
7.11.1	Classificação do defeito como interno ou externo (Inconel 600)	176
7.11.2	Classificação do defeito como localizado ou extenso (Inconel 600)	176
7.11.3	Classificação do defeito como simétrico ou assimétrico (Inconel 600)	176
7.11.4	Classif. da prof. como constante, aumentando ou diminuindo	176
7.11.5	Determinação da profundidade do defeito (Inconel 600)	176
7.11.6	Determinação do volume do defeito (Inconel 600)	177
7.11.7	Conclusões da aplicação do Sistema Fuzzy ao tubo de Inconel 600	177
7.12	Resultados da aplicação do Sistema Fuzzy aos tubos InoxTroc	178
7.12.1	Classificação do defeito como interno ou externo (InoxTroc)	183

7.12.2 Classificação do defeito como localizado ou extenso (InoxTroc)	185
7.12.3 Classificação do defeito como simétrico ou assimétrico (InoxTroc)	186
7.12.4 Classif. da prof. como constante, aumentando ou diminuindo	186
7.12.5 Determinação da profundidade do defeito (InoxTroc)	186
7.12.6 Determinação do volume do defeito (InoxTroc)	186
7.12.7 Conclusões da aplicação do Sistema Fuzzy aos tubos InoxTroc	187
 8 CONCLUSÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	 188
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 192

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_{STC}: área da seção transversal circunferencial de um defeito

Ab: Abertura da pétala da figura de Lissajous

ABENDE: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos

Ap: Amplitude Parcial da figura de Lissajous

Apt: Amplitude Total da figura de Lissajous

ASSIM: defeito assimétrico

Bio: família Biortogonal de Wavelets

CETRE: Centro de Treinamento da ABENDE

CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear

D_{CG}: diâmetro do centro geométrico de um defeito

Db: família Daubechies de Wavelets

Dmey: Discrete Approximation of Meyer Wavelet

EC: Eddy-Current, corrente parasita ou corrente de Foucault

END: Ensaio Não Destrutivos

EPRI: Electric Power Research Institute

EXT: defeito extenso

FPC: Fator de Perda de Capacidade na geração de energia elétrica

Fuzzy: Nebuloso

G: nebulizador Fuzzy *grande*

GV: Gerador de Vapor

Haar: Transformada de Wavelet Haar

IGA: Intergranular Attack (Corrosão Intergranular)

INT: defeito interno

IPEN: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

LabVIEW: Programa de aquisição de dados (National Instruments)

Lift-off: Flutuação da sonda de Eddy-Current

LP: Líquido Penetrante

LOC: defeito localizado

M: nebulizador Fuzzy *médio*

MATLAB: Software para cálculos matemáticos (Mathworks)

MIZ-17ET: aparelho de inspeção produzido pela Zetec

MIZ-40: aparelho de inspeção produzido pela Zetec

MG: nebulizador Fuzzy *muito grande*

MLV: Módulo de Leitura e Visualização de Sinais

MP: nebulizador Fuzzy *muito pequeno*

NDE: Non Destructive Examination

ORNL: Oak Ridge National Laboratory

OUT: defeito externo

P: nebulizador Fuzzy *pequeno*

PROF: profundidade de um defeito

PIT: Pitting (Desgaste Localizado)

P0: Profundidade de defeito 0% (típico)

PROFA: Profundidade do defeito aumenta

PROFD: Profundidade do defeito diminui

PWR: Pressurized Water Reactor (Reator a Água Pressurizada)

PWSCC: Primary Water Stress Corrosion Cracking (Corrosão sob Tensão do Lado da Água do Circuito Primário)

PM: Partículas Magnéticas

RAS: Ruído de Aquisição do Sinal

Rbio: Família Biortogonal Reversa de Wavelets

RMT: Ruído do Material

RPC: Rotating Pancake Coil

SCC: Stress Corrosion Cracking (Corrosão sob Tensão)

SIM: defeito simétrico

SNR: Signal to Noise Rate (Relação Sinal Ruído)

SWSCC: Secondary Water Stress Corrosion Cracking (Corrosão sob Tensão do Lado da Água do Circuito Secundário)

Sym: Família Symlet de Wavelets

Tektronix 5111A: aparelho de inspeção produzido pela Tektronix

Testex Hodking: aparelho de inspeção produzido pela Eddy Current Technology Inc.

TFTC: Transformada de Fourier de Tempo Curto ou Rápida

TF: Transformada de Fourier

TW: Transformada de Wavelet

TWD: Transformada de Wavelet Discreta

VOL: volume de um defeito

Wavelet: Ondaleta

LISTA DE SÍMBOLOS

a: coeficiente de escala da Transformada de Wavelet

A: Aproximação (componente de alta escala e baixa frequência do sinal)

b: coeficiente de posição da Transformada de Wavelet

Ca,b: coeficientes da Transformada de Wavelet

D: Detalhe (componente de baixa escala e alta frequência do sinal)

Db: família Daubechies de Wavelets

Db5N8 (típico): Transformada de Wavelet Daubechies 5 decompondo um sinal em 8 níveis de frequência

D6 a A8 (típico): Detalhes nos níveis de decomposição em frequência 6 e 7 (D6 e D7) e a Aproximação nível DC do sinal na análise por Wavelets

f: Frequência

I: corrente

J: Densidade de Corrente

l: comprimento

Δl : resolução do sinal da inspeção

L: Indução Magnética ou Indutância (consequência da reatância)

n: número de amostras

N: número de espiras de uma bobina

R: componente da Resistência do sinal

$\mathfrak{R}_T$: relutância total

S: Sinal ou área

T: período

v: velocidade de inspeção

V: tensão

V_j : conjunto de sub-espacos

X_L : componente da Reatância do sinal (propriedade de um material reagir à passagem de um campo magnético)

Z : Impedância

α : Ângulo de Fase

β : ângulo de defasagem entre as correntes de Foucault senoidais na superfície e no interior do material

δ : Profundidade de Penetração [mm] ou Condutividade Elétrica [$m/\Omega mm^2$]

ε : Fator de Enchimento de uma sonda de Eddy-Current em um tubo

ϕ : função Wavelet que define detalhes

μ : Permeabilidade Magnética (capacidade de uma material permitir a passagem de um campo magnético) [H/m]

ρ : Resistividade Elétrica [$\mu\Omega.m$]

σ : Condutividade Elétrica [S/m]

ψ : função Wavelet básica de escala que define aproximações

Φ : Fluxo Magnético [Wb]

ω : Frequência Angular

2/18 D5 (típico): 2/18 dos coeficientes $C_{a,b}$ do nível 5 de decomposição em frequência.

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1.1: Substituição de Geradores de Vapor até 1994	6
Tabela 1.2: Substituição de Geradores de Vapor a partir de 1994	7
Tabela 3.1: Frequência, Ângulo de Fase e Amplitude Total (InoxASME02)	32
Tabela 5.1: Arquivos de Sinais Adquiridos	59
Tabela 7.1: Características dos sinais e profundidades dos defeitos (LataoDid01)	144
Tabela 7.2: Relação entre amplitude total e volume dos defeitos (LataoDid01)	146
Tabela 7.3: Volume dos defeitos e amplitudes dos sinais (LataoDid02)	157
Tabela 7.4: Volume dos defeitos e amplitudes dos sinais (LataoDid03)	158
Tabela 7.5: Subconjuntos nebulosos	164
Tabela 7.6: Regras do subconjunto nebuloso Ângulo - INT, OUT, PROF	166
Tabela 7.7: Regras do subconjunto nebuloso Ab, Apt - LOC, EXT	167
Tabela 7.8: Regras do subconjunto nebuloso Apt - VOL	168
Tabela 7.9: Regras do subconjunto nebuloso Ab - PROFA/D	168
Tabela 7.10: Regras do subconjunto nebuloso Ab - SIM, ASSIM	169
Tabela 7.11: Classificação e dimensionamento de defeitos pelo Sistema Fuzzy para o tubo de Inconel 600	175
Tabela 7.12: Classificação e dimensionamento de defeitos pelo Sistema Fuzzy para os tubos InoxTroc01 a 06	182

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Vista em corte de um GV típico	3
Figura 1.2: Evolução do Fator de Perda de Capacidade	4
Figura 1.3: Variações na seção transversal de Desgaste Localizado (PIT)	9
Figura 1.4: Corrosão Intergranular (IGA) em bronze (200X)	10
Figura 1.5: Corrosão Sob Tensão (SCC) em aço inox (500X)	10
Figura 1.6: Principais tipos de degradações em tubos de GV's	10
Figura 3.1: Princípio de funcionamento do Eddy-Current	17
Figura 3.2: O circuito resistivo e sua resposta temporal	18
Figura 3.3: O circuito indutivo e sua resposta temporal	18
Figura 3.4: O circuito elétrico da inspeção por Eddy-Current	19
Figura 3.5: Plano da impedância	20
Figura 3.6: Formação da figura de Lissajous de um defeito volumétrico	21
Figura 3.7: Sonda de inspeção Zetec	23
Figura 3.8: Distribuição das correntes de Foucault em função da profundidade	27
Figura 3.9: “Espalhamento” dos sinais de calibração	29
Figura 3.10: Inspeções do furo passante Ø 1,0 mm do tubo InoxASME02	31
Figura 3.11: Comparação das figuras de Lissajous do furo passante Ø 1,0 mm do tubo InoxASME02 para diversas frequências de inspeção	33
Figura 3.12: Inspeções no tubo InoxDid01 em três velocidades	35
Figura 3.13: Defeitos A, H e I do tubo InoxDid01 em três velocidades	36
Figura 3.14: Seqüência de formação de um sinal de Eddy-Current para o tubo de Inconel 600	37
Figura 3.15: Sinal do entalhe circunferencial interno com 10% de profundidade do tubo LataoASME02	38
Figura 3.16: Indicação horizontal do ruído para o tubo InoxDid01	38
Figura 3.17: Curvas de Calibração para o tubo de Inconel 600 para diferentes frequências de inspeção	39
Figura 3.18: Sinais de calibração para o tubo de Inconel 600	39
Figura 5.1: Hardware utilizado	45
Figura 5.2: Aparelho de inspeção de Eddy-Current Tektronix 5111A	46

Figura 5.3: Aparelho de inspeção de Eddy-Current MIZ-40	47
Figura 5.4: Aparelhagem utilizada	48
Figura 5.5: Tubos LataoASME 01, 03 e 04	50
Figura 5.6: Tubo LataoASME 02	51
Figura 5.7: Tubo LataoDid01	52
Figura 5.8: Tubo LataoDid02	53
Figura 5.9: Tubo LataoDid03	53
Figura 5.10: Tubo LataoDid04	54
Figura 5.11: Tubos InoxASME 01 e 02	55
Figura 5.12: Tubo InoxASME 03	55
Figura 5.13: Tubo InoxDid 01	56
Figura 5.14: Tubo InoxDid 02	56
Figura 5.15: Tubo InoxDid 03	58
Figura 5.16: Diagrama de Blocos do MLV	62
Figura 5.17: Sinais de Eddy-Current na tela do MIZ-17ET	63
Figura 5.18: Sinais de Eddy-Current na tela do Lap Top	63
Figura 5.19: Menu de opções do MLV	64
Figura 5.20: Opções do sub-menu VER DADOS	64
Figura 5.21: Reatância e Resistência de todos os sinais do arquivo LataoASME02A	65
Figura 5.22: Impedância do ARQUIVO COMPLETO LataoASME02A	65
Figura 5.23: Seleção das amostras inicial e final para um TRECHO ISOLADO do arquivo LataoASME02A	66
Figura 5.24: Reatância e Resistência de um TRECHO ISOLADO de sinais do arquivo LataoASME02A	66
Figura 5.25: Impedância de um TRECHO ISOLADO de sinais do arquivo LataoASME02A	67
Figura 6.1: Transformada de Fourier	69
Figura 6.2: Janela no tempo da TFTC	70
Figura 6.3: Transformada de Fourier de Tempo Curto	71
Figura 6.4: Coeficientes da resistência dos sinais dos defeitos do tubo InoxTroc01	73
Figura 6.5: Árvore de decomposição da Análise por Wavelets	74
Figura 6.6: Árvore de decomposição da Análise por Pacotes de Wavelets	74
Figura 6.7: Função Wavelet Haar	76

Figura 6.8: Família da função Wavelet Daubechies	77
Figura 6.9: Função Wavelet Morlet	77
Figura 6.10: Função Wavelet Biortogonal	78
Figura 6.11: Função Wavelet Chapéu Mexicano	79
Figura 6.12: Sinal original do defeito C do tubo LataoDid02	81
Figura 6.13: Resistência e reatância do sinal do defeito C do tubo LataoDid02 decompostas com a TW Daubechies 10	82
Figura 6.14: Remoção das frequências altas e médias do sinal do defeito C do tubo LataoDid02	83
Figura 6.15: Remoção do RAS do sinal do defeito C do tubo LataoDid02	84
Figura 6.16: Remoção do RAS do sinal do defeito B do tubo LataoASME01	85
Figura 6.17: Remoção do RAS do sinal do defeito C do tubo LataoASME01 com a TW Symlet 5 Nível 3 A3 e Nível 7 D4 a A7	85
Figura 6.18: Remoção do RAS do sinal do defeito H do tubo LataoASME01 com a TW Daubechies 8 Nível 2 A2 e Nível 7 D4 a A7	86
Figura 6.19: Remoção do RAS do sinal do defeito G do tubo LataoASME01 com a TW Haar Nível 7 D2 a A7	87
Figura 6.20: Comparação da remoção do RAS Rbio1.1 x Rbio 6.8 N5 D4 a A5	88
Figura 6.21: Remoção do RAS Rbio 6.8 N5 D4 a A5 x Rbio 6.8 N9 D4 a A5	88
Figura 6.22: Remoção do RAS do sinal do defeito F do tubo InoxDid03 com as TW's Rbio 5.5 e Db5 Nível 8 D6 a A8	89
Figura 6.23: Resistência e reatância do furo passante Ø 0,9 mm do tubo InoxDid02	90
Figura 6.24: Impedância do furo passante Ø 0,9 mm do tubo InoxDid02	91
Figura 6.25: Pré-processamento do sinal do furo passante Ø 0,9 m do tubo InoxDid02D com TW Db5 N8 R: 2/13D6 X _L : D4 a A8	92
Figura 6.26: Pré-processamento do sinal do furo passante Ø 0,9 m do tubo InoxDid02D com TW Db5 N8 R: D4 e D5 X _L : D4 a A8	93
Figura 6.27: Pré-processamento do sinal do furo passante Ø 0,9 m do tubo InoxDid02D com TW Db5 N8 R: 2/18D5 X _L : 4/18D5 e D6 a A8	94
Figura 6.28: Melhor pré-processamento do sinal do furo passante Ø 0,9 m do tubo InoxDid02D com TW Db5 N8 R: 2/18D5 X _L : D3 a A8	95
Figura 6.29: Melhor pré-processamento da reatância do sinal do furo passante Ø 0,9 m do tubo InoxDid02D	96
Figura 6.30: Melhor pré-processamento da resistência do sinal do furo passante Ø 0,9 m do tubo InoxDid02D	96

Figura 6.31: Sinal original dos defeitos A e B do tubo InoxDid01	97
Figura 6.32: Resistência e Reatância dos defeitos A e B do tubo InoxDid01	97
Figura 6.33: Remoção de RMT do sinal do defeito A do tubo InoxDid01E com a TW Daubechies 5 em 7 níveis	99
Figura 6.34: Remoção de RMT do sinal do defeito A do tubo InoxDid01E com a TW Biortogonal 3.9 em 7 níveis	98
Figura 6.35: Sinal original do defeito B do tubo InoxDid01	99
Figura 6.36: Pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoxDid01 com TW Bior 3.5 N8 R e X_L : D6 e 1/13 D7	100
Figura 6.37: Pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoxDid01 com TW Biortogonal Reversa 4.4 N8 R: D6 e X_L : D5 a A8	101
Figura 6.38: Melhor pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoxDid01	101
Figura 6.39: Resistência e reatância do sinal do defeito B do tubo InoxDid01 decompostas com a TW Daubechies 5 em 8 níveis	102
Figura 6.40: Seleção dos coeficientes no pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoxDid01 com a TW Daubechies 5 em 8 níveis.....	102
Figura 6.41: Comparação dos resultados da utilização da TW e código de um defeito do tubo InoxDid02 no outro defeito	104
Figura 6.42: Comparação dos resultados da utilização da TW e código de um defeito do tubo InoxDid01 no outro defeito	105
Figura 6.43: Pré-processamento do sinal do defeito A do tubo InoxDid01 com duas TW's diferentes	106
Figura 6.44: Funções Wavelets básicas Biortogonal e Daubechies	107
Figura 6.45: Reatância dos defeitos do tubo InoxDid02 com o efeito "Lift-off"	108
Figura 6.46: Reatância dos defeitos do tubo InoxDid02 sem o efeito "Lift-off"	108
Figura 7.1: Diagrama de blocos do PPS	117
Figura 7.2: Menu principal de opções do PPS	117
Figura 7.3: Leitura de dados do PPS	118
Figura 7.4: Resistência e reatância dos defeitos do tubo LataoASME01	119
Figura 7.5: Detecção de defeitos (Reatância x Resistência)	120
Figura 7.6: Redução dos limites de corte pelo pré-processamento	121
Figura 7.7: Detecção de defeitos	122
Figura 7.8: Figura de Lissajous incompleta do defeito	123
Figura 7.9: Figura de Lissajous completa do defeito	123
Figura 7.10: Apresentação do número de defeitos detectados	124

Figura 7.11: Seleção do defeito para análise	124
Figura 7.12: Sinal original e sinal pré-processado do defeito selecionado	125
Figura 7.13: Leitura do ângulo de fase e da amplitude total do sinal	126
Figura 7.14: Novas características dos sinais de Eddy-Current	127
Figura 7.15: Leitura do ângulo de fase pelas extremidades da figura de Lissajous	128
Figura 7.16: Localização da extremidade da pétala	129
Figura 7.17: Diagrama de blocos do procedimento de leitura do ângulo de fase	130
Figura 7.18: Leitura das Amplitudes Parciais quando existe reta P2-P3	131
Figura 7.19: Leitura das Amplitudes Parciais quando não existe reta P2-P3	132
Figura 7.20: Leitura das Aberturas quando existe reta P2 -P3	133
Figura 7.21: Leitura das Aberturas quando não existe reta P2 -P3	133
Figura 7.22: Trajetória normal do sinal	134
Figura 7.23: Gênese anômala do sinal	135
Figura 7.24: Gênese normal do sinal (início da Perna 1 no Quadrante 4)	136
Figura 7.25: Características do defeito	136
Figura 7.26: Seleção da escala da figura de Lissajous	137
Figura 7.27: Defeitos circunferenciais simétricos (a) e assimétricos (b)	138
Figura 7.28: Defeitos circunferenciais concêntricos (a) e excêntricos (b)	138
Figura 7.29: Processamento do sinal do defeito C do tubo LataoDid01	140
Figura 7.30: Processamento do sinal do defeito B do tubo LataoDid01	142
Figura 7.31: Processamento dos sinais dos defeitos E e F do tubo LataoDid01	143
Figura 7.32: Curva de Calibração para o tubo LataoDid01	144
Figura 7.33: Comparação entre os defeitos B e C do tubo LataoDid01	145
Figura 7.34: Processamento do sinal do defeito A do tubo LataoDid01	147
Figura 7.35: Comparação entre os sinais dos defeitos A e B do tubo LataoDid01	149
Figura 7.36: Processamento do sinal do defeito K do tubo InoxDid03	151
Figura 7.37: Processamento dos sinais dos defeitos N e O do tubo InoxDid03	152
Figura 7.38: Figura de Lissajous do furo passante do tubo InoxDid03	154
Figura 7.39: Figura de Lissajous do furo não passante interno do tubo InoxDid03	155
Figura 7.40: Furos não passantes externos (tubo LataoDid02)	156
Figura 7.41: Furos não passantes profundidades 20%, 30% e 40% (tubo LataoDid02) ..	156
Figura 7.42: Furos não passantes profundidades 50% a 80% (tubo LataoDid02)	157

Figura 7.43: Volume dos defeitos e amplitude dos sinais (tubo LataoDid02)	157
Figura 7.44: Furos cegos Ø 2,8 e 4,8 mm do tubo LataoDid03	158
Figura 7.45: Volume dos defeitos e amplitude dos sinais (tubo LataoDid03)	159
Figura 7.46: Furos oblongos Ø 2,0 mm do tubo LataoDid04	160
Figura 7.47: Furos oblongos Ø 2,8 mm do tubo LataoDid04	160
Figura 7.48: Nebulização da entrada Abertura 1	162
Figura 7.49: Nebulização da entrada Ângulo de Fase.....	163
Figura 7.50: Nebulização da entrada Amplitude	163
Figura 7.51: Entradas e saídas do subconjunto nebuloso Ângulo – INT, OUT, PROF	164
Figura 7.52: Entradas e saídas do subconjunto nebuloso Ab, Apt – LOC, EXT	164
Figura 7.53: Entradas e saídas do subconjunto nebuloso Ab – SIM, ASSIM	164
Figura 7.54: Entradas e saídas do subconjunto nebuloso Ab – PROFA,D	165
Figura 7.55: Entradas e saídas do subconjunto nebuloso Apt – VOL	165
Figura 7.56: Funções de pertinência para o subconjunto nebuloso Ab, Apt – LOC, EXT ...	165
Figura 7.57: Funções de pertinência para o subconjunto nebuloso Ab – SIM, ASSIM	165
Figura 7.58: Funções de pertinência para o subconjunto nebuloso Ab – PROFA,D	166
Figura 7.59: Funções da saída PROFUNDIDADE	170
Figura 7.60: Funções da saída para defeito EXTERNO	171
Figura 7.61: Funções de saída para VOLUME	171
Figura 7.62: Extração das características do sinal do defeito N do tubo de Inconel 600 .	172
Figura 7.63: Classificação INTERNO/EXTERNO e determinação da PROFUNDIDADE	172
Figura 7.64: Determinação do VOLUME do defeito	173
Figura 7.65: Classificação do defeito como LOCALIZADO ou EXTENSO	173
Figura 7.66: Classificação do defeito como SIMÉTRICO	174
Figura 7.67: Classificação do defeito quanto à variação da PROFUNDIDADE	174
Figura 7.68: Sinais originais do tubo InoxTroc01	178
Figura 7.69: Sinais originais do tubo InoxTroc03	179
Figura 7.70: Sinais originais do tubo InoxTroc04	179
Figura 7.71: Sinais originais do tubo InoxTroc05	179
Figura 7.72: Sinais originais do tubo InoxTroc06	180
Figura 7.73: Sinais originais do tubo InoxTroc02	180
Figura 7.74: Sinais pré-processados do tubo InoxTroc02	180

Figura 7.75: Pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoxTroc02	181
Figura 7.76: Extração das características do sinal do defeito B do tubo InoxTroc02	181
Figura 7.77: Corrosão do tubo InoxTroc01	183
Figura 7.78: Corrosão do tubo InoxTroc05 (trecho de 410 a 470 mm)	184
Figura 7.79: Corrosão do tubo InoxTroc05 (trecho de 550 a 610 mm)	184
Figura 7.80: Defeitos localizados típicos dos tubos InoxTroc02, 03, 04 e 06	185

1. INTRODUÇÃO

Os Geradores de Vapor (GV's) de centrais nucleares do mundo todo têm apresentado sérios problemas que levam freqüentemente a paradas na operação, causando perdas na capacidade de oferta de energia, grandes despesas com reparos e substituições, bem como a exposição de pessoal à radiação.

Nos feixes tubulares dos GV's é onde se concentram os maiores problemas. Os vazamentos de água do circuito primário para o circuito secundário podem levar, além das perdas de disponibilidade e de dinheiro, a sérios prejuízos ecológico-sociais, caso ocorra contaminação do meio ambiente.

O envelhecimento prematuro dos tubos dos GV's é a razão dos vazamentos ocorridos. Uma eficiente monitoração do estado do feixe tubular e o diagnóstico preciso de falhas são as ações mais apropriadas para evitar os sérios problemas dos GV's e suas conseqüências, permitindo uma gestão adequada da sua vida útil.

A inspeção dos tubos dos Geradores de Vapor por meio de correntes parasitas, Foucault ou Eddy-Current é um método não destrutivo que consiste na passagem de uma sonda pelo interior dos tubos e é uma das formas mais eficientes e consagradas que existem no momento para a detecção de defeitos com perda de material ou não no feixe tubular. No Capítulo 2 são apresentados os principais tipos de Ensaio Não Destrutivo utilizados na inspeção dos tubos dos GV's. No Capítulo 3 é apresentado o método de inspeção por Eddy-Current. Os sinais gerados pela passagem da sonda permitem a localização e o dimensionamento de defeitos. Entretanto, esses sinais apresentam muitos ruídos e são de difícil interpretação dada a sua complexidade. A interpretação é baseada no julgamento de inspetores, o que dá um caráter subjetivo à inspeção e reduz o índice de acerto dos diagnósticos, comprometendo a segurança, a manutenção preditiva, a análise do envelhecimento dos tubos e a quantificação da vida e da sobre-vida dos Geradores de Vapor. No Capítulo 4 apresenta-se o estado da arte sobre a utilização da inspeção por Eddy-Current para a localização e o dimensionamento de defeitos em tubos de GV's.

Dada a relevância do problema, o principal objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia aplicada ao tratamento e à interpretação dos sinais de defeitos volumétricos (com perda de material), que reduza a subjetividade na inspeção por Eddy-Current, contribuindo de forma original para o diagnóstico da condição operacional dos Geradores de Vapor. Para atingir tal objetivo, foram gerados dados experimentais obtidos em inspeções realizadas em tubos de diversos materiais com defeitos artificiais, que simulam os principais tipos de defeitos encontrados nos Geradores de Vapor e caracterizados pela perda volumétrica de material (Capítulo 5).

Os sinais dos defeitos foram tratados com Transformadas de Wavelets (TW's) para a remoção do ruído e para a extração de características usuais e de novas características propostas, por um programa especialmente concebido para esse fim (Capítulo 6).

No capítulo 7 é apresentado um sistema Fuzzy de auxílio à interpretação de sinais que incorpora o conhecimento adquirido com a análise da base experimental e que foi testado para sinais de defeitos artificiais e reais.

Os objetivos detalhados deste trabalho de pesquisa são:

- domínio da técnica de inspeção por Eddy-Current através da interação com inspetores e empresas dessa especialidade bem como o acompanhamento de inspeções nos Geradores de Vapor da Usina Nuclear de Angra I;
- criação de um banco de dados de sinais de inspeções realizadas em tubos experimentais de laboratório e em tubos de campo;
- utilização de TW's para o pré-processamento de sinais visando a remoção de ruídos;
- utilização das figuras de Lissajous como fonte de informações para a extração de características que permitam a classificação e o dimensionamento de defeitos; e,
- utilização da lógica Fuzzy como auxílio ao processo de decisão na classificação e no dimensionamento de defeitos.

A metodologia consiste na reprodução por meio de um sistema Fuzzy do aprendizado obtido na inspeção de defeitos volumétricos em tubos de laboratório e reais e a sua aplicação a novas inspeções permitindo assim um processo contínuo de aprimoramento.

As contribuições originais deste trabalho são:

- exploração experimental de novas características dos sinais de Eddy-Current no plano da impedância (aberturas e amplitudes das figuras de Lissajous) além da sistematização na determinação do ângulo de fase, característica tradicional atualmente utilizada;

- desenvolvimento e teste de uma metodologia baseada em Transformadas de Wavelets para a remoção do ruído do sinal proveniente do material;
- criação de programas computacionais para automatizar a visualização e o processamento de sinais; e,
- criação de uma máquina de inferência Fuzzy que organize todo o conhecimento oriundo dos resultados experimentais, bem como agregue facilmente novos conhecimentos e contribua no processo de decisão, auxiliando os inspetores de Eddy-Current no diagnóstico de defeitos volumétricos em tubos de Geradores de Vapor.

1.1 Histórico

Atualmente existem no mundo aproximadamente 250 usinas nucleares operando com reatores a água pressurizada tipo PWR (Pressurized Water Reactor). Dessas usinas, mais de um terço têm atualmente apresentado problemas nos seus GV's.

Os Geradores de Vapor (Figura 1.1) são grandes trocadores de calor do tipo casco e tubos em forma de U invertido, que transferem calor do circuito primário para o circuito secundário de uma usina PWR gerando vapor e movendo turbo-geradores. Tipicamente, uma planta de 1300 MW_e possui 4 GV's com 19 metros de altura, 5 metros de diâmetro e cerca de 9000 tubos por GV.

Como componentes de interface entre os circuitos primário e secundário, os Geradores de Vapor têm grande importância para a planta pois, além de transferirem calor eficientemente entre os dois circuitos, também devem impedir qualquer passagem de água radioativa pressurizada do circuito primário para o circuito secundário, que opera a uma pressão menor (Lopez, 1989), servindo como barreira de isolamento entre a parte nuclear e a parte não nuclear da usina.

Esta dupla função dos GV's resulta em requisitos de projeto que levam a resultados opostos, exigindo dos projetistas uma dosagem criteriosa entre as funções de transferência de calor e contenção da passagem de radioatividade. A espessura da parede dos tubos deve ser pequena para reduzir a resistência térmica, porém deve ser suficiente para garantir a confiabilidade operacional em vista da degradação dos tubos. As dimensões dos tubos devem levar a um feixe tubular compacto visando uma alta eficiência na troca de

calor. Por outro lado, o passo dos tubos no feixe deve ser suficientemente grande para que a inspeção e a manutenção sejam feitas de maneira eficiente.

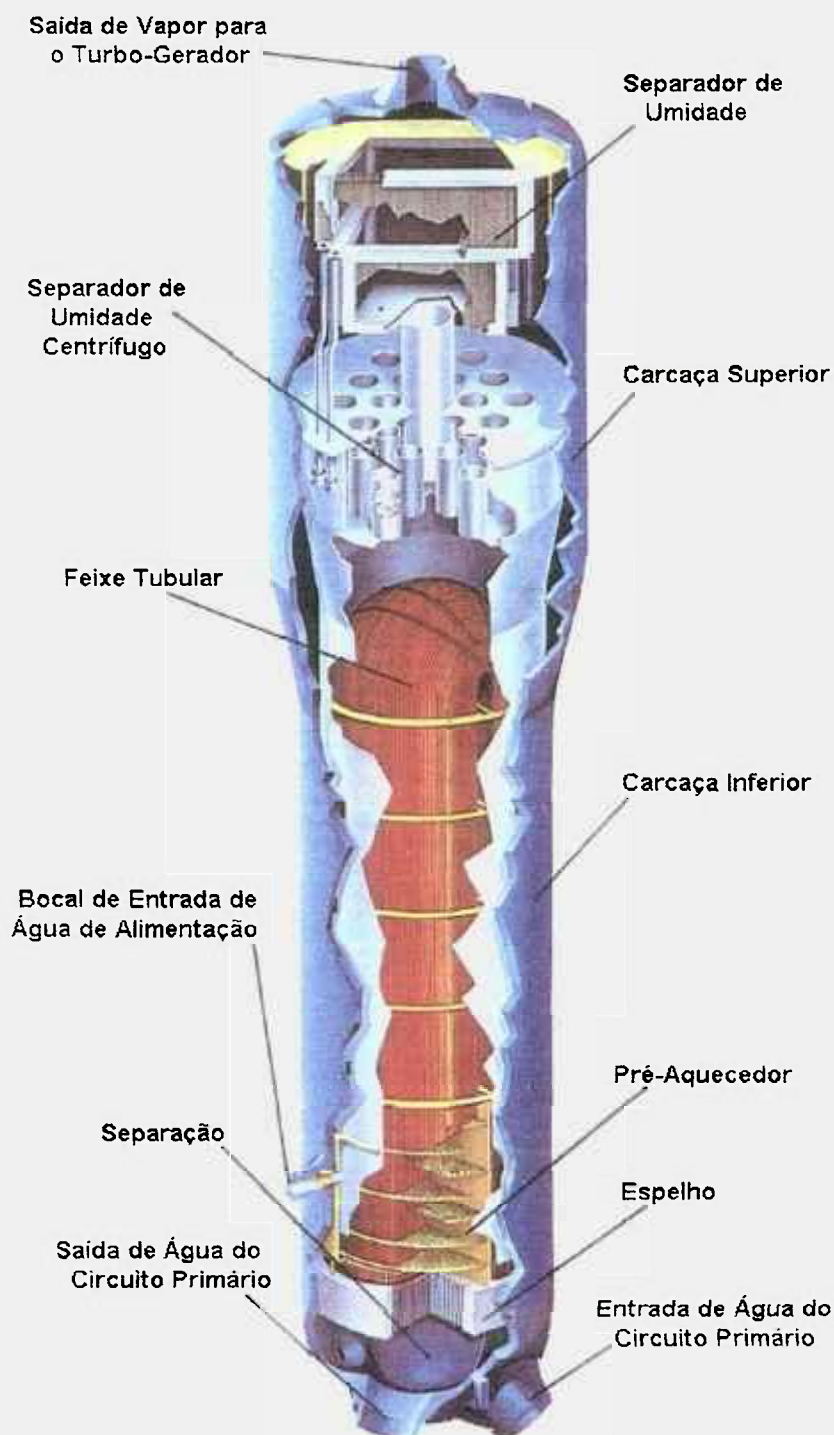


Figura 1.1: Vista em corte de um GV típico
(Westinghouse Electric Corporation)

Os primeiros projetos de usinas levaram em conta que a vida útil dos Geradores de Vapor seria a mesma dos demais componentes do primário, pois nada naquela época sugeria o contrário. Entretanto, a experiência operacional mostrou ao longo dos anos que essa consideração não era correta e que os Geradores de Vapor eram muito suscetíveis a falhas (Whyatt *et al.*, 1995).

A vida típica dos GV's foi originalmente prevista para 30 a 40 anos. No entanto, 35 Geradores de Vapor em 12 usinas tiveram que ser substituídos nos primeiros 14 anos de operação devido a problemas não previstos, que não foram resolvidos ou progrediram (Odar *et al.*, 1996).

Temas como o envelhecimento, o gerenciamento do envelhecimento e a extensão de vida (sobre-vida) de componentes tais como os Geradores de Vapor, têm se tornado cada vez mais importantes e freqüentes nos últimos 15 anos pois as usinas nucleares têm licenças de operação limitadas no tempo e decisões devem ser tomadas, pois a operação posterior ao término do período operacional previamente considerado é cada vez mais provável. Nesse contexto, deve-se avaliar criteriosamente essa operação e em quais condições ocorrerá.

A análise do envelhecimento basicamente demonstra a integridade de um componente e garante, dessa forma, sua segurança operacional (Bartonicek *et al.*, 1996). Considera, primeiramente, que o seu estado de qualidade, ou seja, seu estado de integridade é suficiente para atender as solicitações a que o componente é submetido. A seguir, considera o estabelecimento de um conjunto qualificado de monitorações que garante a operação futura e a limitação de possíveis mecanismos de falha.

As licenças de operação das usinas nucleares somente devem ser fornecidas se a condição de segurança for regularmente atualizada.

A garantia da segurança pode ser obtida por meio do estabelecimento de uma base de segurança e de sua verificação através de redundâncias independentes.

A base de segurança utiliza os princípios da qualidade total aplicados ao projeto, aos materiais e à fabricação.

A verificação da segurança por meio de redundâncias independentes é fundamentada na análise operacional, no ponto de vista de projeto e nas implicações para componentes novos ou já em operação. Em qualquer caso, é necessário demonstrar uma alta condição de qualidade de cada componente e cuidar para que possíveis mecanismos de

falha operacional sejam monitorados e considerados continuamente. Além disso, deve ser levada em conta qualquer evolução de conhecimento sobre o assunto.

A fabricação é importante no estabelecimento da condição de segurança de um componente e sua integridade só poderá ser comprovada se existir um controle eficiente da composição e do comportamento dos materiais, bem como de todos os detalhes construtivos.

As conclusões sobre a integridade de um componente após um determinado período de operação são tomadas em função do conjunto de considerações de projeto associadas às de fabricação e operacionais.

Os Geradores de Vapor são equipamentos fundamentais em usinas PWR. Mais de 30 anos de experiência na operação de usinas mostram que a confiabilidade dos GV's afeta significativamente a disponibilidade e o desempenho geral da usina, gerando custos não previstos que a indústria nuclear tem que absorver.

Os problemas de corrosão ou degradação mecânica freqüentemente levam à realização de manutenções preventivas ou corretivas que são onerosas em termos de trabalho de reparo, perda de potência e exposição do pessoal envolvido à radiação. O número de tamponamentos de tubos realizados nessas manutenções têm excedido os valores previstos (da Silveira, 2002). Além disso, o tempo gasto em uma inspeção ou parada não prevista ou mais demorada, também leva a consideráveis prejuízos aos usuários, acionistas e clientes, resultantes da falta de disponibilidade da usina.

Somente nos Estados Unidos, os Geradores de Vapor foram responsáveis por uma média de 3,4% do Fator de Perda de Capacidade (FPC) de 1975 a 1994 (Odar *et al.*, 1996). Entre 1975 e 1988, paradas não previstas de Geradores de Vapor resultaram em perdas de geração da ordem de 135 milhões de MWh em todo o mundo (Blomgren, 1990).

A Figura 1.2 apresenta a evolução do Fator de Perda de Capacidade ao longo dos anos nos Estados Unidos, devido a problemas nos Geradores de Vapor, incluindo substituições.

As ações corretivas promovidas pelos fabricantes vão de melhorias operacionais a onerosas harmonizações de projeto, materiais estruturais e da química da água, visando a melhoria do desempenho e redução do envelhecimento precoce do equipamento.

Muitos fabricantes buscam o aumento do desempenho operacional, implementando estratégias de utilização baseadas em seus próprios bancos de dados com

experiências em usinas que contêm práticas de controle operacional e de melhorias de projeto.

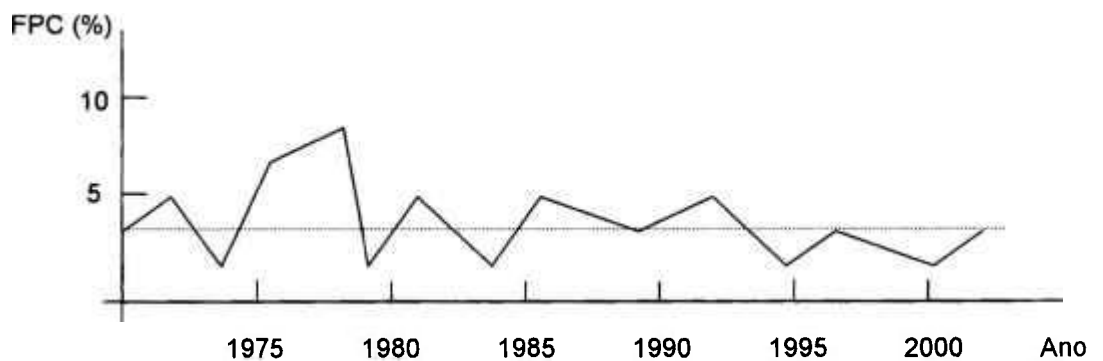


Figura 1 .2: Evolução do Fator de Perda de Capacidade

Muitos fabricantes buscam o aumento do desempenho operacional, implementando estratégias de utilização baseadas em seus próprios bancos de dados com experiências em usinas que contêm práticas de controle operacional e de melhorias de projeto.

Devido à natureza da energia nuclear e sua repercussão social, os problemas nos GV's levaram a avaliações relativas à segurança do reator e à segurança do público. Esforços, verbas e um tempo considerável têm sido demandados para a eliminação desses problemas ou para a sua redução a níveis aceitáveis.

O Gerador de Vapor é, atualmente, o equipamento crítico quanto ao desenvolvimento de novos conceitos e projetos de usinas nucleares (Carelli *et al.*, 2002).

A monitoração mais precisa do estado operacional dos Geradores de Vapor por meio da inspeção por Eddy-Current é uma das ferramentas vitais para as próximas gerações de usinas.

1.2 A integridade dos feixes tubulares dos Geradores de Vapor

Os feixes tubulares dos Geradores de Vapor são particularmente sujeitos a falhas e degradação, motivados por uma série de fatores que agem em conjunto ou isoladamente, tais como falhas nos códigos de projeto, nas técnicas analíticas e experiência disponíveis na época do projeto, aparecimento de mecanismos não previstos de degradação de materiais e componentes devido às altas temperaturas de operação, altas vazões e concentração de elementos corrosivos nos meios fluidos por um tratamento inadequado da química da água (Carter, 1979).

Os mecanismos de falha de Geradores de Vapor são a fadiga, a corrosão sob carga mecânica ou não e as deformações em larga escala com destruição. As causas isoladas ou combinadas destes mecanismos são as cargas, os materiais e o meio em que se encontra o GV. A maior parte dos danos é causada por processos de degradação mecânica ou corrosão química (Odar, 1996).

A degradação mecânica inclui o desgaste, a fadiga e os danos causados por impactos de objetos. O desgaste é causado pelo contato superficial em um processo de impacto-deslizamento e esfregamento (“fretting”) (da Silveira, 2002).

Os transitórios operacionais de carga levam à fadiga dos materiais. A fadiga é provocada pelo meio, pela ciclagem das cargas térmicas e mecânicas e pode ser forçada pela forma construtiva do componente.

As vibrações induzidas pelo escoamento e pela ebulição levam a desgastes inaceitáveis dos tubos do GV onde eles estão em contato com os suportes e as chicanas. Tem sido observado em todo o mundo que ocorre uma maior redução de espessura em dois pontos do feixe tubular, ou seja, na região dos tubos em U e na região do economizador do GV. A causa destes problemas resultantes do uso é o projeto inadequado do GV (Dow, 1989).

Os processos relacionados com a corrosão são mais comuns em Geradores de Vapor do tipo recirculação, como os da Combustion Engineering e Westinghouse, enquanto que a degradação mecânica ocorre mais freqüentemente em unidades de um único passe como as da Babcock & Wilcox (Upadhyaya, 1997).

Os processos de degradação química ou corrosão que podem levar à ruptura são o Desgaste Geral (“Wastage”), o Afinamento da Parede (“Thinning”), o Desgaste Localizado

(“Pitting” - PIT), a Corrosão Intergranular (“Intergranular Attack” - IGA), a Corrosão sob Tensão do Lado da Água do Primário (Primary Water Stress Corrosion Cracking - PWSCC) e a Corrosão sob Tensão do Lado da Água do Secundário (Secondary Water Stress Corrosion Cracking – SWSCC), conforme citado em International Atomic Energy Agency (1996).

O PIT é uma degradação volumétrica e resulta de diferenças galvânicas no tubo. O Desgaste Localizado ácido (“Acidic Pitting”) é o tipo mais comum e é associado à introdução de cloretos, ânions de sulfetos e óxidos de cobre no GV por outros componentes da planta. O IGA é caracterizado pelo ataque relativamente uniforme do contorno do grão na superfície do tubo e pode ser volumétrico ou bi-dimensional.

A corrosão química é o fator que mais contribui no IGA com a tensão contribuindo com menor intensidade (Rozenfeld, 1981). A SCC consiste de uma fissura simples ou múltiplas fissuras maiores com ramificações de pequenas a moderadas e é considerada como bi-dimensional com largura e profundidade. A SCC ocorre no lado do circuito secundário como uma combinação de corrosão química e tensão (Jones, et al., 1998). Tal como a SWSCC, a PWSCC é o resultado de corrosão química e tensão, e normalmente ocorre nas variações de geometria da tubulação tais como expansões, restrições ou em seções de tubos que foram tensionados, como, por exemplo, o lado interno dos tubos em U nas regiões de baixos raios de curvatura do Gerador de Vapor (Stellwag, et al., 1987).

As Figuras 1.3, 1.4 e 1.5 apresentam os defeitos PIT, IGA e SCC.

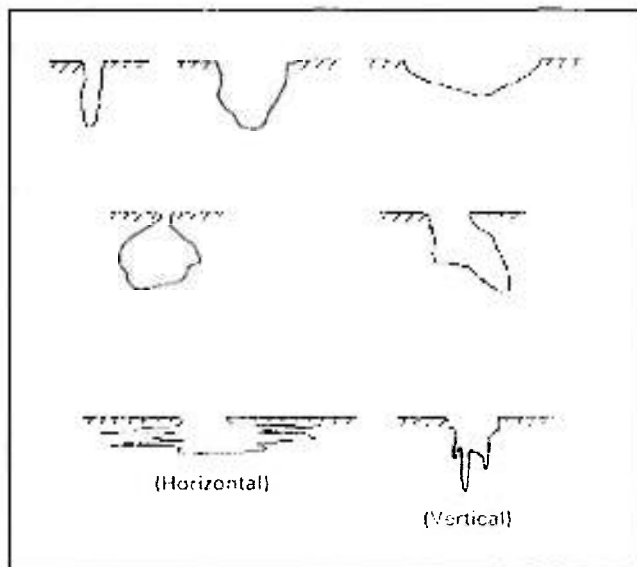


Figura 1.3 Variações na seção transversal de Desgaste Localizado (PIT)
(American Society of Materials V 13)

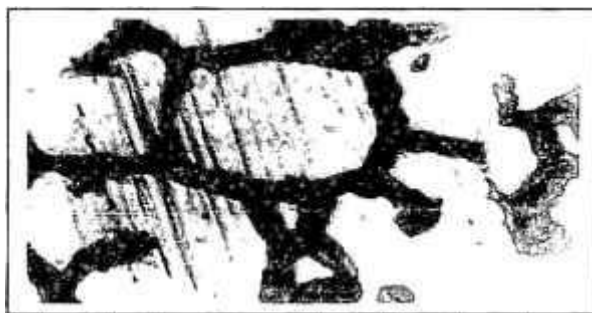


Figura 1.4: Corrosão Intergranular (IGA) em bronze (200X)
(Corrosion Engineering – Mars G. Fontana, Norbert P. Greene)

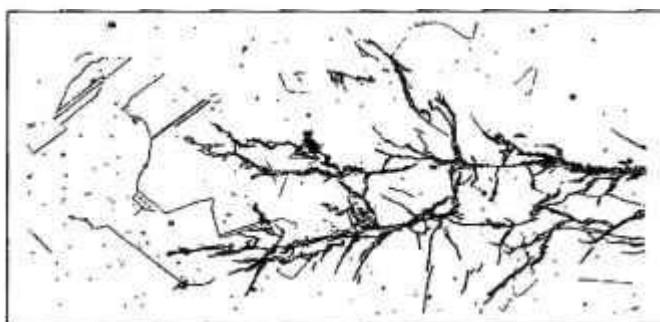


Figura 1.5: Corrosão Sob Tensão (SCC) em aço inox (500X)
(Corrosion Engineering – Mars G. Fontana, Norbert P. Greene)

A Figura 1.6 ilustra a localização dos principais tipos de degradações de tubos em Geradores de Vapor.

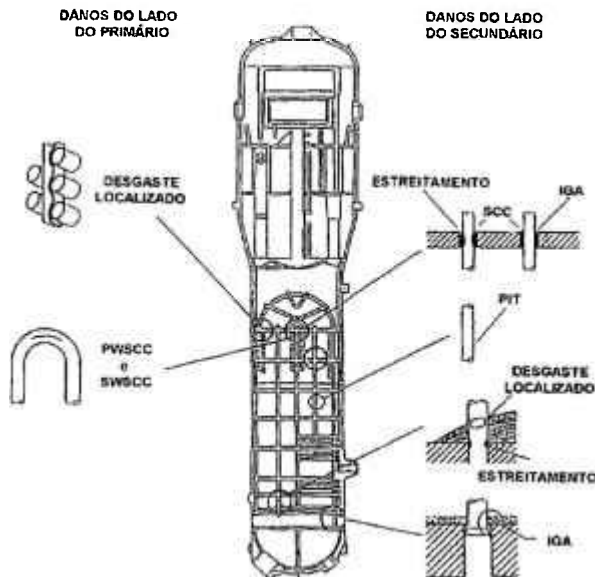


Figura 1.6: Principais tipos de degradações em tubos em GV's.
(Siemens AG)

Objetivando correlacionar os diversos tipos de defeitos com os seus sinais típicos (assinaturas), neste trabalho foram realizadas inspeções em tubos com diversos defeitos artificiais que simulam os principais tipos de defeitos volumétricos encontrados nos GV's

2. INSPEÇÕES DO FEIXE TUBULAR

Os END (Ensaio Não Destrutivo) são utilizados para detectar a falta de homogeneidade ou defeitos nos tubos do feixe tubular do Gerador de Vapor, através da medição de características físicas específicas, sem prejudicar a posterior operação do equipamento (American Society for Metals, 1989).

Os END constituem uma das principais ferramentas do Controle da Qualidade, têm sua aplicação justificada pela redução de custos, aumento da segurança, aumento da disponibilidade e são utilizados na prevenção de falhas e acidentes ou, quando já ocorreram, na geração de informações para reparo.

Considerando que os GV's inspecionados devem continuar a operar tão logo quanto possível, a inspeção deve demandar pouco tempo. Outro fator importante a considerar é a contaminação por radionuclídeos a que os inspetores são submetidos caso a proximidade do operador ou o tempo de inspeção não sejam apropriados.

Nas inspeções de Geradores de Vapor, o END que utiliza o princípio das correntes parasitas ou Eddy-Current é um dos métodos de inspeção mais apropriados pois o arranjo do feixe tubular dificulta e até impede o acesso à superfície externa dos tubos que normalmente têm diâmetro de 22,22 mm (7/8 polegada) ou 19,05 mm (3/4 polegada) e só permitem o acesso ao seu interior por meio de sondas. Assim, a monitoração do estado de integridade do feixe tubular do Gerador de Vapor é realizada somente pela inspeção por Eddy-Current durante as paradas praticamente anuais programadas para a recarga de combustível do reator de uma usina PWR.

Em uma das paradas da Usina Nuclear de Angra dos Reis, acompanhada pelo autor em Abril de 2001 (Lopez, 2001), foi constatada a importância da inspeção por Eddy-Current. A empresa contratada para a inspeção (Westinghouse) montou dois grupos independentes de 4 inspetores com a mesma função de interpretar os sinais adquiridos pelas sondas introduzidas no interior dos tubos do Gerador de Vapor. Os sinais foram interpretados praticamente em tempo real em vista da necessidade de reduzir o tempo total da parada, que é determinado pelo tempo gasto pela passagem da sonda e pela importância

manobra de colocação da sonda na entrada de cada tubo por meio de mecanismos robotizados. Em paralelo ao trabalho dos inspetores da Westinghouse, outros dois grupos de consultores independentes, especialmente contratados pela Eletronuclear, verificaram os resultados das avaliações.

Existem diversos tipos de ensaios não destrutivos e, basicamente, a escolha do tipo de END depende das propriedades físicas do material, da geometria do componente e do meio onde ele opera.

A seguir serão apresentadas breves descrições dos principais tipos de inspeções utilizadas e suas limitações quando aplicadas ao feixe tubular do GV. O Capítulo 3 é dedicado somente à apresentação da teoria e prática da inspeção por correntes parasitas que é a técnica mais adequada à inspeção de Geradores de Vapor.

2.1 Inspeção Visual

É considerado um método primário nos programas de controle da qualidade e é o método mais simples de inspeção que existe. É de fácil execução, baixo custo e não requer equipamento especial. A inspeção visual requer boa visão, boas condições de iluminação e experiência no reconhecimento de defeitos. Alguns equipamentos também podem ser utilizados tais como lentes de aumento, boroscópio, câmeras de televisão, etc.

A inspeção visual é largamente utilizada na inspeção de componentes ou juntas soldadas, onde uma rápida detecção e correção de defeitos significam economia. No entanto, o olho humano é capaz de identificar somente defeitos superficiais maiores que 60 μm . Além disso, a forma construtiva do feixe tubular, com milhares de tubos, impede a visão dos tubos internos do feixe e não é possível visualizar o interior dos tubos. A utilização de sondas endoscópicas poderia contornar esse problema, porém as incrustações no interior do tubo e, em especial aquelas que se depositam em fissuras, tornam o emprego da visão pouco relevante. A utilização de reveladores de defeitos nas inspeções que utilizam Líquidos Penetrantes (LP) não contribui para solucionar a falta de acesso visual à grande maioria dos tubos do GV.

Defeitos menores que 60 μm necessitam de outras técnicas de inspeção tais como os ensaios de Partículas Magnéticas (PM) e Correntes Parasitas, de Foucoalt ou Eddy-Current, que são os ensaios não destrutivos baseados em princípios magnéticos mais

utilizados, embora a Inspeção Visual possa ser utilizada em condições especiais para complementação/confirmação de diagnósticos de defeitos superficiais.

2.2 Partículas Magnéticas

A inspeção por meio de Partículas Magnéticas (PM) é utilizada na localização de descontinuidades superficiais ou sub-superficiais em peças acabadas ou não, que utilizam materiais ferromagnéticos. A peça, ou parte dela, é submetida a um campo magnético. Na região magnetizada, as descontinuidades existentes causam um campo de fuga de fluxo magnético. Com a aplicação de partículas magnéticas, ocorre a sua aglomeração no campo de fuga pois as partículas são atraídas devido ao surgimento de polos magnéticos. Essa aglomeração indica o contorno do campo de fuga, fornecendo a visualização do formato da descontinuidade.

Este método de inspeção só se aplica a materiais ferromagnéticos, ou seja, materiais que possuem alta permeabilidade magnética ($\mu \gg 1$ H/m). A permeabilidade magnética é a capacidade de um material permitir a passagem de um campo magnético pelo seu interior. A propriedade de um material reagir à passagem de um campo magnético é denominada reatância. Essa reação faz surgir a indução magnética ou indutância.

As inspeções por PM praticamente se limitam apenas a componentes construídos com ferro e aço pois são os materiais que contêm os elementos ferro, níquel e cobalto, que proporcionam a passagem de campos magnéticos.

A inspeção por PM não se aplica a materiais paramagnéticos, ou seja, materiais cuja permeabilidade magnética é igual a 1 ($\mu = 1$ H/m) e que não permitem o fluxo magnético. Os materiais paramagnéticos mais utilizados em trocadores de calor são o alumínio e suas ligas, magnésio e suas ligas, aço inoxidável austenítico (AISI 314/316), titânio e ligas de cobre e alumínio (latão). As unidades mais utilizadas para fluxo magnético são: Weber, Gauss, Wester e Miós.

Os materiais diamagnéticos são aqueles materiais cuja permeabilidade magnética é menor que 1 ($\mu < 1$ H/m). Esses materiais (por exemplo, o cobre, a prata e o ouro), são os melhores condutores de eletricidade mas a permeabilidade magnética é muito baixa e até repelem o campo magnético.

A inspeção por partículas magnéticas depende da visualização da aglomeração das partículas inviabilizando a sua aplicação a feixes tubulares. Além disso, não é viável a utilização de partículas magnéticas (pó de ferro) no interior de um GV onde a limpeza é um fator de grande importância.

2.3 Líquido Penetrante

Este método emprega um líquido que é aplicado na superfície de materiais sólidos e não porosos, e que penetra nas discontinuidades abertas na superfície, revelando os defeitos. Após um determinado tempo de penetração, o excesso é removido, aplica-se um revelador e é feita a observação das discontinuidades através da observação do vazamento do líquido penetrante.

A inspeção por líquido penetrante pode ser usado em qualquer material. É essencial que o material seja cuidadosamente limpo, de outra maneira será impossível que o líquido penetre no defeito. No entanto, este ensaio não se aplica a GV's por requerer o uso da visão e líquidos penetrantes e revelador que contaminam o interior do GV.

2.4 Ultra-som

Na inspeção por ultra-som, ondas ultra-sônicas são dirigidas ao componente inspecionado por um transmissor. A sua reflexão ou refração, captada por dispositivos receptores especiais, detecta as diferenças entre o sinal transmitido e o sinal esperado na reflexão permitindo determinar a localização e a característica de um defeito, medir espessuras ou caracterizar materiais. Muitas vezes, o transmissor e o receptor são construídos em um único transdutor.

O ultra-som é utilizado na inspeção de soldas, avaliação do efeito da corrosão, detecção de defeitos laminares em chapas planas, etc., sendo largamente utilizado nos setores petroquímico, siderúrgico, naval e aeronáutico.

Na inspeção de Geradores de Vapor o ultra-som oferece excelentes resultados porém é um método que demanda muito tempo e é de custo elevado.

2.5 Radiografia

Na radiografia, são utilizados os raios X e os raios Gama como radiação penetrante para inspeção de materiais, que se distinguem da luz visível por possuírem um comprimento de onda extremamente pequeno, o que lhes dá a capacidade de atravessarem materiais que absorvem ou refletem a luz visível. Esses raios deslocam-se em linha reta e não são afetados por campos elétricos ou magnéticos e possuem a propriedade de impressionar filmes fotográficos. Esta inspeção, embora não contamine com impurezas o interior do GV, não é aplicada devido às características de arranjo do feixe tubular que impede o acesso à quase totalidade dos pontos de interesse para inspeção.

2.6 Emissão Acústica

A emissão acústica é o fenômeno que ocorre quando uma descontinuidade é submetida a solicitações térmicas ou mecânicas. Uma área contendo defeitos é uma área de concentração de tensões que, uma vez estimulada por um esforço externo, origina uma redistribuição de tensões localizadas. Este mecanismo ocorre com a liberação de energia na forma de ondas de tensão transientes. A técnica de emissão acústica consiste em captar esta perturbação no meio através de transdutores piezoelétricos distribuídos pela estrutura. Esses receptores transformam a energia mecânica em elétrica, sendo os sinais digitalizados e armazenados para futura análise através de parâmetros previamente estabelecidos.

Este método detecta as descontinuidades nos estágios iniciais e permite que toda a superfície do equipamento seja inspecionada de uma só vez. A inovação desta técnica está na possibilidade de realizar a inspeção com o equipamento em operação. A sua aplicação a Geradores de Vapor é pouco viável devido à existência de centenas ou até milhares de tubos no feixe tubular.

3. INSPEÇÃO POR MEIO DE CORRENTES PARASITAS

A inspeção por meio de correntes parasitas ou Eddy-Current é largamente aplicada na detecção de falhas tais como trincas em barras, tubos, fios e peças grandes de formas diversas. É também aplicada para o estudo de dimensões, como por exemplo, controle de diâmetro e espessura de parede de peças cilíndricas, tubos e esferas, bem como para a medição da espessura de placas, películas, revestimentos metálicos ou não metálicos.

A inspeção por Eddy-Current é, atualmente, uma das formas mais eficientes de detectar e monitorar falhas ou defeitos que possam comprometer a integridade dos tubos de Geradores de Vapor e tem sido a técnica utilizada. Esta inspeção permite determinar o tipo, o tamanho, a forma, a geometria e a posição das falhas ou defeitos dos tubos inspecionados além de revelar variações de composição e dimensões. Outros tipos de ensaios não destrutivos tais como a radiografia não são aplicáveis. A alta velocidade da inspeção em comparação com outros métodos e a possibilidade de automação com avaliações feitas através de computador, são os grandes potenciais deste método de inspeção.

3.1 O princípio da inspeção por Eddy-Current

A inspeção por Eddy-Current é baseada no princípio eletromagnético das correntes parasitas ou seja, a indução eletromagnética de correntes elétricas circulares, também conhecidas como correntes de Foucault no material inspecionado por meio de um campo magnético alternado primário com determinadas frequência e intensidade, gerado por uma bobina indutora de forma geométrica apropriada e excitada por uma corrente alternada (Stegemann, 1986). Este método possui uma grande resolução na detecção de defeitos, detecção de discontinuidades, determinação das diferenças nos componentes de uma liga ou constituição de estrutura e tempera, controle de tratamento térmico, detecção de textura de laminação e determinação de variações de composição e dimensões de materiais.

Conforme ilustrado na Figura 3.1, as correntes parasitas geram um campo magnético alternado secundário, o qual é oposto ao campo primário, gerado pela bobina.

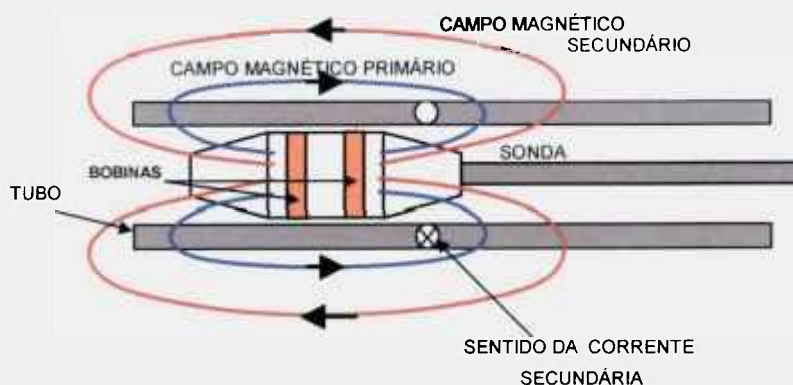


Figura 3.1: Princípio de funcionamento do Eddy-Current

O campo magnético secundário se opõe ao campo magnético primário e tenta anular o seu efeito. A tensão na sonda diminui e a fase muda proporcionalmente à magnitude relativa entre as componentes resistivas e indutivas das correntes induzidas.

Assim, o campo primário será tanto mais atenuado quanto mais intenso for o campo secundário. O sinal de medição, muitas vezes detectado por uma bobina de medição separada, resulta da superposição dos campos primário e secundário. Em outras palavras, cada variação do campo secundário influencia a superposição dos dois campos que é responsável pelo sinal resultante, já que o campo primário é normalmente mantido constante. Pelo fato das correntes parasitas serem responsáveis pela formação do campo secundário, o comportamento das correntes parasitas se reflete no sinal de medição.

A formação das correntes parasitas no material testado depende, além da geometria, primeiramente das características eletromagnéticas do material como a condutividade elétrica (σ) e a permeabilidade magnética (μ), em especial para material ferromagnético (500 a 2000 Gauss). A não homogeneidade do material influencia no comportamento das correntes parasitas, permitindo detectar inclusões e falhas internas ao material.

As alterações no campo secundário são causadas por variações na intensidade das correntes parasitas e podem ocorrer devido a variações locais de σ e/ou μ . Isto significa que alterações locais destas variáveis podem ser detectadas pelo método das correntes parasitas. Porém, alterações locais de condutividade podem ter origens completamente diversas tais como trincas e descontinuidades no material com diferentes formas geométricas ou variações na composição do material (Stegemann, 1997).

Um campo magnético é gerado por uma bobina de um circuito elétrico. Os circuitos elétricos podem ser resistivos, indutivos, capacitivos ou combinações deles.

No circuito resistivo apresentado na Figura 3.2, segundo a lei de Ohm $V = R I$, onde V é a tensão senoidal, R é a resistência e I é a corrente, a tensão sempre está em fase com a corrente.

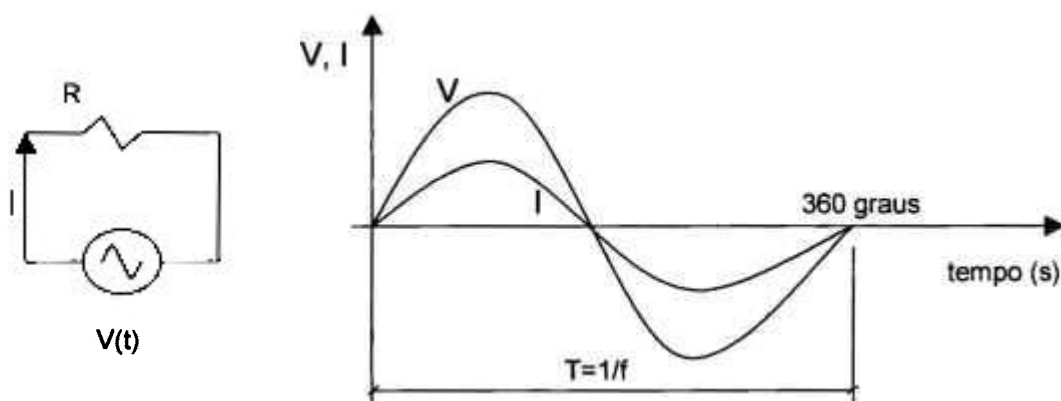


Figura 3.2: O circuito resistivo e sua resposta temporal

A tensão e a corrente são dadas em função do tempo ou do ângulo. Define-se o período $T = 1/f$, onde f é a frequência da tensão dada em s^{-1} . Também pode ser utilizada a frequência angular $\omega = 2\pi f$ (rad/s).

No circuito indutivo apresentado na Figura 3.3 a tensão e a corrente estão defasadas de 90° e a reatância indutiva X_L é dada pela seguinte expressão:

$$X_L = 2\pi f L \quad (3.1)$$

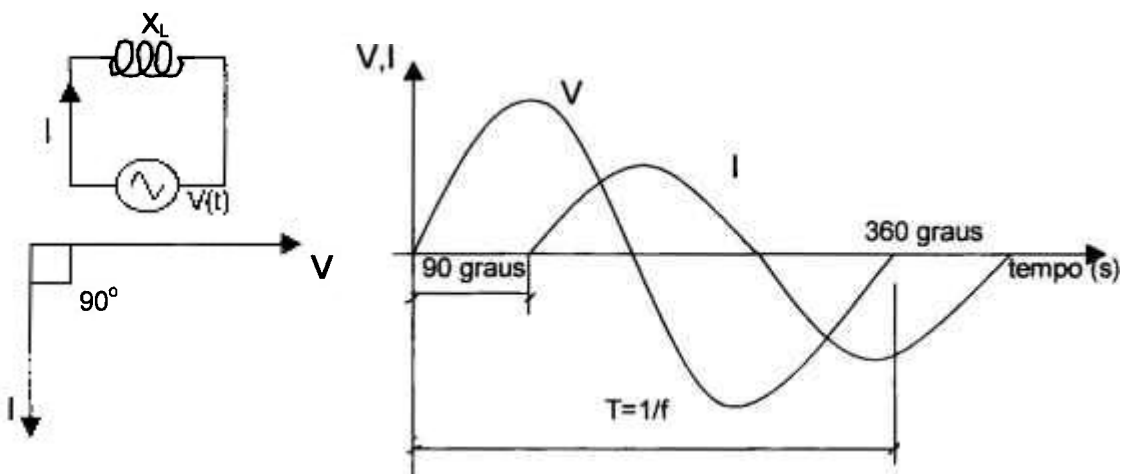


Figura 3.3: O circuito indutivo e sua resposta temporal

Na expressão 3.1, L é a indutância que, por sua vez, é dada pela expressão:

$$L = N^2 / \mathfrak{R}_T \quad (3.2)$$

Na expressão da indutância, N é o número de espiras da bobina e $\mathfrak{R}_T$ é a relutância total. A relutância é a reação de um meio à passagem de um fluxo magnético. O fluxo magnético, cuja unidade é Wb (Weber) é dado pela seguinte expressão:

$$\Phi = N I / \mathfrak{R}_T \quad (3.3)$$

O fluxo magnético variável gerado pela corrente alternada que passa pelo circuito, gera uma força eletromotriz (f.e.m.) induzida que gera as correntes de Foucault. A relutância total é a somatória das reações dos diversos meios atravessados pelas linhas de fluxo. A Figura 3.1 apresenta as linhas de fluxo geradas por sondas circunferenciais utilizadas nas inspeções por Eddy-Current em tubos de Geradores de Vapor.

A relutância total é dada pela equação (3.4) onde l é o comprimento, μ é a permeabilidade magnética, S é a área e $a, b, c, \dots$ são os meios atravessados pelas linhas de fluxo.

$$\mathfrak{R}_T = l_a / \mu_a S_a + l_b / \mu_b S_b + l_c / \mu_c S_c + \dots \quad (3.4)$$

Os circuitos elétricos podem ser puramente resistivos, como nos aquecedores equipados com resistências. Circuitos indutivos puros não existem pois sempre existe uma resistência associada a uma bobina. Os circuitos capacitivos possuem capacitores, porém efeitos capacitivos também podem ser provocados pelas bobinas dos circuitos indutivos. Os circuitos utilizados nas inspeções por Eddy-Current não possuem capacitores e os efeitos capacitivos indesejáveis são minimizados a ponto de serem desprezíveis (Kriezis, 1992). Portanto, o modelo elétrico adequado para explicar os fenômenos elétricos na inspeção por Eddy-Current pode ser representado por um circuito RL. A Figura 3.4 apresenta o esquema do circuito utilizado nas inspeções por Eddy-Current.

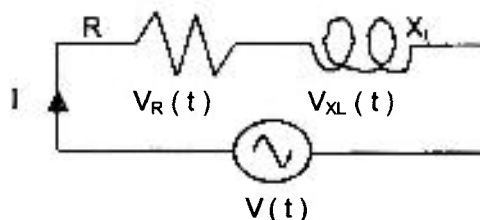


Figura 3.4: Circuito elétrico da inspeção por Eddy-Current

A tensão nesse circuito é dada por:

$$V(t) = V_R(t) + V_{XL}(t) = Z \cdot I(t) \quad (3.5)$$

onde Z é a impedância total. Tanto a resistência R quanto a reatância indutiva X_L são compostas por parcelas da bobina e do tubo inspecionado.

Utilizando o plano complexo, neste caso chamado de plano da impedância, para representar a resistência e a reatância indutiva, a impedância é representada por um vetor de comprimento Z e pelo ângulo de fase α (American Society for Metals, 1989) e definida pelas equações (3.6) e (3.7):

$$\vec{Z} = \vec{X}_L + \vec{R} \quad (3.6)$$

ou

$$|Z| = \sqrt{X_L^2 + R^2} \quad (3.7)$$

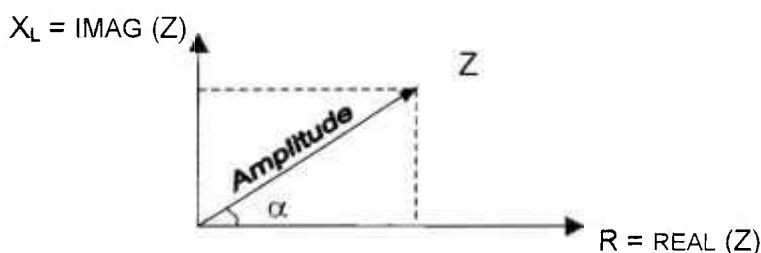


Figura 3.5: Plano da impedância

O módulo de Z é definido como a amplitude do sinal e a interação entre os campos magnéticos primário e secundário provoca variações no ângulo de fase e na intensidade das correntes induzidas geradas no tubo. Dessa forma, o valor da impedância e o ângulo de fase variam.

O percurso seguido pelo valor da impedância forma uma figura de Lissajous em forma de “8” que é característica das inspeções por Eddy-Current.

A tensão na sonda depende das propriedades elétricas do tubo, sendo que, para materiais não magnéticos tais como o Inconel 600 e o aço inoxidável 316L, utilizados neste trabalho, a condutividade elétrica (σ) é a propriedade do material que afeta significativamente a impedância.

A Figura 3.6 ilustra a passagem de uma sonda por um defeito volumétrico de um tubo de Inconel 600 e a correspondente formação da figura de Lissajous.

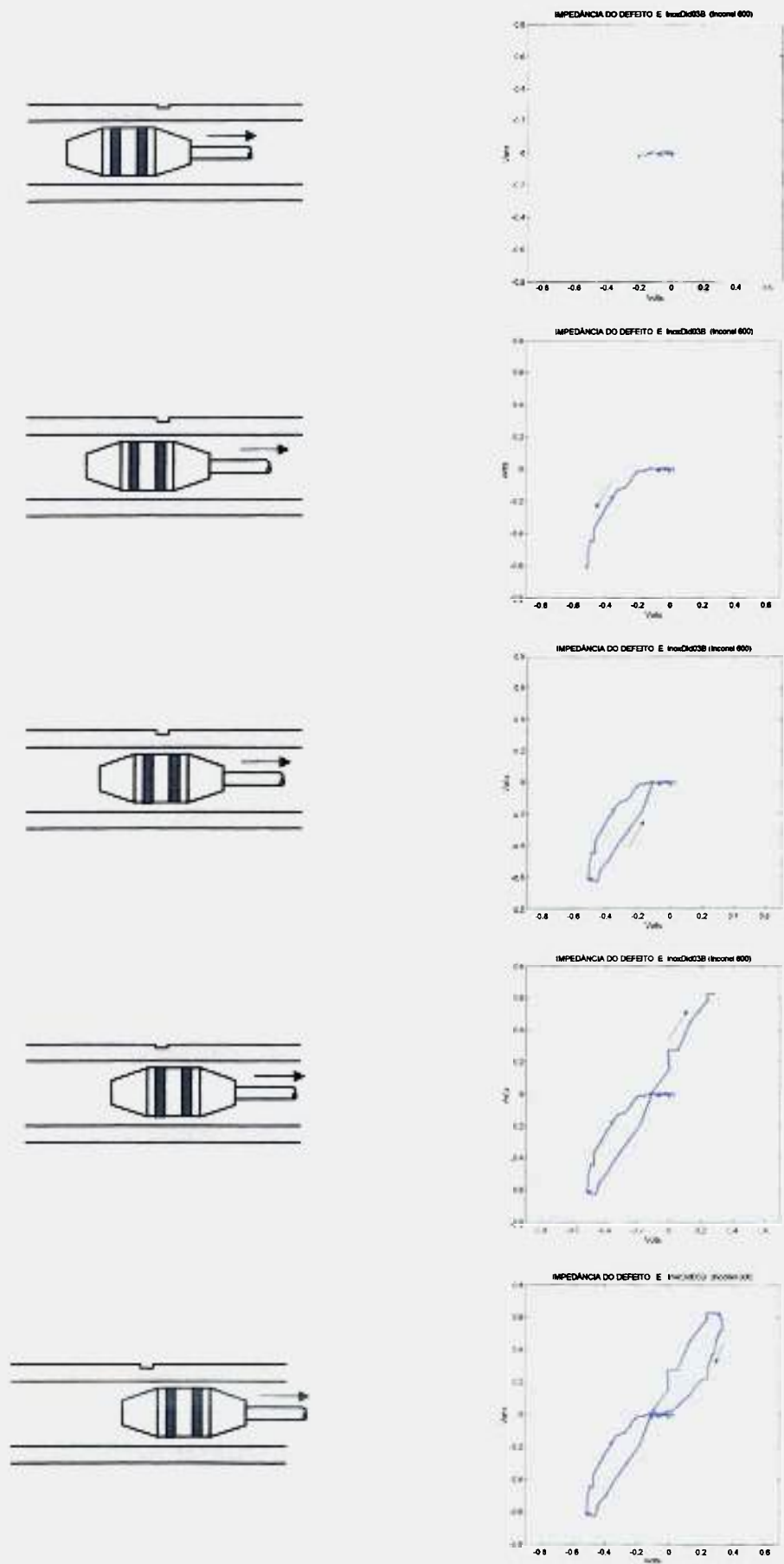


Figura 3.6: Formação da figura de Lissajous de um defeito volumétrico

Na região do defeito, no lugar de existir aço, cuja condutividade elétrica é $\delta_{\text{aço}} \cong 1,4 \text{ m} / \Omega\text{mm}^2$ existe ar, cuja condutividade elétrica é praticamente zero.

Como o ar tem uma condutividade menor que a condutividade elétrica do aço, ocorre uma redução nas correntes parasitas e diminui o fluxo magnético secundário. Como consequência da redução da impedância total do circuito a tensão na bobina aumenta. As variações da tensão e do ângulo de fase estão diretamente relacionadas com as dimensões do defeito.

3.2 Variação da distância tubo-sonda

A passagem da bobina pelo interior do tubo só é possível se houver uma folga apropriada entre o diâmetro interno do tubo e o diâmetro externo da sonda pois a superfície interna do tubo é irregular podendo conter incrustações ou amassamentos. Essa folga é conhecida na prática das inspeções por Eddy-Current como “enchimento”.

O Fator de Enchimento é definido por:

$$\varepsilon = \frac{d^2}{D^2} \quad (3.8)$$

onde d é o diâmetro externo da sonda e D é o diâmetro interno do tubo. O Fator de Enchimento é, portanto, uma forma de quantificar a qualidade do acoplamento eletromagnético entre o tubo e a sonda.

A folga entre a sonda e o tubo provoca um movimento radial da sonda conforme ela se desloca pelo interior do tubo. Esse movimento de mudança da distância entre a sonda e o tubo é chamado de flutuação ou “Lift-off”.

O “Lift-off” é um efeito não desejado porém inevitável nas inspeções por Eddy-Current e as indicações apresentadas nos aparelhos de inspeção incluem esse efeito. Neste trabalho, o efeito “Lift-off” será removido por meio de Transformadas de Wavelets, conforme apresentado no item 6.4.3.

3.3 Sondas de Eddy-Current

Quanto à aplicação, as sondas podem ser classificadas em três tipos: superfície, transmissão/recepção ou interna/externa.

As sondas de superfície são **utilizadas** para a inspeção externa de peças diversas. A sua utilização pode ser manual ou **automática**. As sondas de superfície podem ter uma ou duas bobinas.

As sondas do tipo transmissão/recepção possuem duas bobinas: uma excitadora e uma de teste. Essas bobinas são montadas a uma certa distância entre si. Nesse tipo de sonda, a seleção correta das bobinas e circuitos elétricos leva a uma excelente sensibilidade na detecção de defeitos em geometrias difíceis de tubos, em tubos retos ou tubos em U (Joubert et al., 2001). A Figura 3.7 apresenta a sonda para inspeção de tubos de Geradores de Vapor utilizada neste trabalho. A sonda é do tipo transmissão/recepção e é dotada de duas bobinas circunferenciais.



Figura 3.7: Sonda de inspeção Zetec

As sondas internas ou externas são utilizadas principalmente para a inspeção de materiais contínuos, de seção transversal constante, tais como barras, tubos e arames. As sondas externas ou envoltivas não podem ser utilizadas em tubos de Geradores de Vapor devido a problemas de arranjo. Para os tubos são utilizadas as sondas internas, geralmente com duas bobinas. As bobinas destes sensores são coaxiais com os tubos inspecionados.

Não existe um tipo único de sonda utilizada extensivamente a todos os tipos de defeitos. Para cada defeito ou grupo de defeitos existe uma sonda específica. A seguir, são relacionados os principais grupos de defeitos que exigem sondas específicas.

Grupo A: fissuras circunferenciais e desgaste localizado na região da ligação tubo-espelho. As sondas devem ser compensadas para efeitos circunferenciais tais como a expansão de tubos na placa suporte.

Grupo B: defeitos com componente axial tal como o desgaste localizado. As sondas devem ser compensadas para os efeitos circunferenciais de expansões, placa suporte e depósitos uniformes, permitindo a detecção de defeitos localizados frequentemente mascarados por ruídos.

Grupo C: defeitos com orientação circunferencial e pequenos defeitos que exijam alta resolução, problema muito comum na indústria nuclear.

Grupo D: fissuras circunferenciais ou axiais dentro ou fora de tubos e mangas ou buchas em tubos que exigem a mesma sensibilidade da sonda.

Existem diversos tipos de sondas de Eddy-Current disponíveis no mercado. A utilização de sondas padrão industrial em tubos de Geradores de Vapor pode levar a problemas sérios como os relatados na Steam Generator Newsletter (1996). De acordo com essa referência, em 1991, a Unidade 2 da Usina Nuclear de Bruce foi desligada devido a problemas de vazamentos nos tubos do Gerador de Vapor, oriundos de corrosão assistida por concentração de tensões na superfície externa dos tubos. A inspeção padrão industrial falhou na localização de defeitos, exceto nos casos em que a fratura estava completamente propagada através da parede do tubo, já com vazamento. O baixo rendimento da sonda industrial de Eddy-Current foi atribuído a severas distorções e obscurecimento de sinais de trincas existentes em locais onde os tubos apresentavam seções deformadas e por variações nos depósitos de magnetita na superfície interna dos tubos no local das fissuras.

As correntes parasitas que as bobinas das sondas induzem nos tubos inspecionados são orientadas circunferencialmente. Infelizmente, pequenas fissuras circunferenciais não interagem bem com as correntes parasitas geradas pelas bobinas tornando estas sondas pouco sensíveis a este tipo de fissuras. Devido a esta característica indesejável das bobinas das sondas, são utilizadas em todo o mundo sondas do tipo bobina-panqueca rotativa (rotating pancake coil - RPC) que possuem um dispositivo de atuação mecânica que gira a sonda circunferencialmente para a inspeção de tubos nos quais se suspeita que existam fissuras circunferenciais. As correntes parasitas induzidas por estas sondas possuem componentes circunferenciais e axiais que interagem com as fissuras orientadas em todas as direções.

Joubert *et al.* (2001) utilizaram uma sonda dotada de 16 bobinas radiais defasadas de $22,5^\circ$ e montadas entre duas bobinas axiais. A sonda foi testada em 4 tubos de Inconel 600 e apresenta as funções de transmissão e recepção separadas, ou seja, as bobinas axiais são usadas como excitadoras e o conjunto de bobinas radiais é usado para amostrar a

A frequência de inspeção utilizada foi de 240 kHz e foi utilizado um dispositivo mecânico que deslocou a sonda ao longo do tubo proporcionando uma frequência de amostragem de uma amostra por milímetro.

Segundo os autores, o sistema proposto alia a localização circunferencial de defeitos à alta velocidade de inspeção pois permite um posicionamento espacial mais preciso e não apresenta o inconveniente da rotação da sonda, o que consome um tempo excessivo.

Essas bobinas detectam bem defeitos internos ou externos, axiais ou circunferenciais em profundidades de 40% a 100% da espessura da parede do tubo. No entanto, defeitos de 10% a 20% de profundidade são precariamente detectados, especialmente quando orientados circunferencialmente, devido ao processo de fabricação do tubo que cria deformações internas na parede do tubo e induz um ruído de alta magnitude (baixa frequência), e que torna elevada a relação ruído/sinal do defeito.

Todos os defeitos dos 4 tubos utilizados foram detectados e localizados com um erro menor que 5 mm na direção axial e 22,5° na direção circunferencial. No entanto, os defeitos orientados axialmente tiveram detectadas apenas as suas extremidades levando a uma possível interpretação errada da existência de 2 defeitos circunferenciais. Tal limitação foi contornada pela utilização simultânea de bobinas axiais com bobinas radiais.

A utilização da sonda proposta é bastante promissora e os autores apresentam que está em fabricação uma sonda com 32 bobinas radiais, visando a melhoria da precisão na localização circunferencial, o que tornará a sonda de construção ainda mais complexa.

3.3.1 As bobinas das sondas

Quanto ao número de bobinas, as sondas podem ser absolutas (uma bobina) ou diferenciais (duas bobinas).

As sondas absolutas são utilizadas para a diferenciação de materiais tais como o aço 1010 do aço 1020. Também são utilizadas para a determinação de dureza, tratamento térmico e qualquer medição de espessura de camada de material que esteja ligada à estrutura do material e sua granulação.

As sondas diferenciais são utilizadas para a detecção de defeitos. Possuem duas bobinas (uma primária e uma secundária), ligadas em circuitos diferenciais, que se auto-comparam para a geração do sinal. Quando passam por um defeito onde não há material, ocorre um desbalanceamento no campo magnético, pois o ar é um material paramagnético ($\mu = 1 \text{ H/m}$).

O material do corpo da bobina deve apresentar uma alta permeabilidade magnética ($\mu \gg 1$ H/m) para permitir a passagem do campo magnético gerado pelo enrolamento. As sondas utilizadas nas inspeções por Eddy-Current são construídas com núcleos de ferrita que possuem alta permeabilidade magnética, ou seja, são bons “condutores” de magnetismo.

A inspeção por Eddy-Current pode usar as seguintes formas para a montagem das bobinas:

Diferencial autocomparável: neste tipo de montagem, o campo magnético da primeira bobina é comparado com o campo magnético da segunda bobina de uma mesma sonda de inspeção.

Diferencial por comparação externa: neste método, o campo magnético de uma das bobinas da sonda de inspeção é comparado com o campo magnético da bobina de uma outra sonda que está em um outro tubo sem defeitos.

3.4 Frequência de inspeção

A frequência de inspeção é a frequência da corrente alternada senoidal que passa na bobina primária.

O campo magnético gerado pela passagem da corrente alternada na bobina primária da sonda penetra no material inspecionado e gera as correntes parasitas no seu interior.

A região de geração das correntes parasitas no tubo inspecionado depende da frequência da corrente de inspeção e de propriedades magnéticas do material tais como a permeabilidade magnética (μ) e a condutividade elétrica (σ).

Com frequências altas, as correntes parasitas são geradas próximas à superfície e, quanto maior a frequência da corrente alternada, maior sua tendência de permanecer na superfície. Com frequências baixas, a penetração das correntes parasitas no material é maior. Esse efeito é conhecido como Efeito Pelicular ou “Skin Effect”.

Considerando todas as possibilidades de diâmetros, materiais e métodos de inspeção em tubos de Geradores de Vapor, as frequências mais utilizadas situam-se no intervalo de 100 Hz a 6 MHz. Basicamente, existem dois efeitos combinados que determinam a profundidade de penetração:

- as correntes de Foucault que fluem no material produzem um campo magnético secundário que se opõe ao campo magnético primário produzido pela bobina da sonda, reduzindo a fluxo magnético líquido. Consequentemente ocorre uma redução no fluxo das correntes de Foucault com o aumento da profundidade; e,
- as correntes de Foucault se concentram na superfície mais próxima da bobina da sonda.

Dessa forma, essas correntes agem como obstáculos ao campo magnético da bobina, reduzindo o campo magnético em profundidades maiores e, consequentemente, reduzindo as correntes de Foucault.

A densidade das correntes de Foucault J_x diminui exponencialmente com a profundidade (General Dynamics, 1967), conforme apresentado na Figura 3.8.

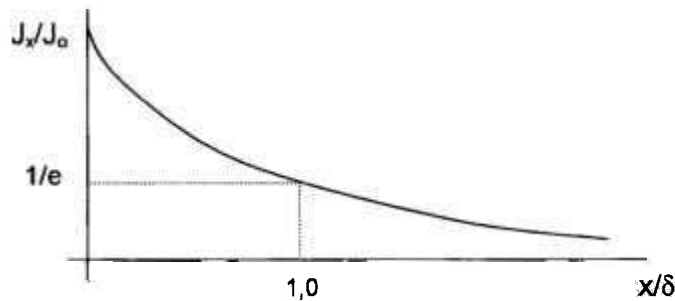


Figura 3.8: Distribuição das correntes de Foucault em função da profundidade

A variação da densidade das correntes parasitas em um condutor semi-infinito é dada por (American Society for Metals , 1989):

$$\frac{J_x}{J_0} \propto e^{-\beta} \text{sen}(\omega t - \beta) \quad (3.9)$$

onde, J_x : densidade de corrente a uma profundidade x

J_0 : densidade de corrente na superfície

$e^{-\beta}$: redução da densidade das correntes de Foucault em função da profundidade

$\text{sen}(\omega t - \beta)$: aumento da defasagem do sinal senoidal da corrente com a profundidade

β : ângulo de defasagem entre as correntes de Foucault senoidais na superfície e no interior do material

$$\beta = \frac{x}{\delta} \text{ (radianos)} \quad (3.10)$$

x : profundidade (mm)

δ : profundidade de penetração padrão (mm)

A profundidade de penetração padrão δ é definida como a profundidade correspondente à redução da densidade de correntes para $1/e$ ($e=2,7183$), ou aproximadamente para 37% da densidade superficial e é dada pela seguinte expressão (General Dynamics, 1967):

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f \mu_r}} \quad (3.11)$$

onde ρ é a resistividade elétrica [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$], f é a frequência de inspeção [Hz] e μ_r é a permeabilidade magnética relativa, ou seja a permeabilidade do material do tubo em relação à permeabilidade magnética do vácuo que é uma constante universal e que vale $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [H/m].

A equação da profundidade padrão é estritamente correta apenas para materiais infinitamente espessos e para campos magnéticos planares. A profundidade de penetração padrão calculada segundo a expressão anterior deve ser considerada mais como um parâmetro do material do que como uma medida verdadeira da penetração das correntes parasitas.

As inspeções por Eddy-Current utilizam basicamente os métodos de frequência única e de multi-frequência.

No método de frequência única, são utilizadas correntes com apenas uma frequência na bobina de teste. Este método se aplica satisfatoriamente na determinação da composição de ligas, estrutura cristalina, determinação de dureza e teor de ferrita. Também se aplica na medição de variações dimensionais em barras, chapas e esferas bem como na detecção de defeitos tais como trincas. Neste método, utiliza-se a técnica de discriminação de fase com o objetivo de suprimir algumas interferências indesejáveis. No entanto, este método não se aplica à inspeção de tubos de Geradores de Vapor onde os suportes geram sinais de grande amplitude, impedindo a detecção de defeitos nessa região.

O método de multi-frequência, ou seja, a utilização de várias frequências em uma mesma inspeção, utilizando para isso vários canais do aparelho de inspeção, é mais apropriado para a inspeção de tubos de Geradores de Vapor pois a utilização do princípio da passagem pela bobina de teste de correntes com mais de uma frequência contorna o problema da introdução de grandes sinais causados por elementos estruturais, outros objetos metálicos ou materiais adjacentes. A partir de duas frequências é possível inspecionar de forma eficiente os tubos nas regiões dos suportes e dos espelhos onde são gerados grandes

sinais que impedem a detecção de defeitos que normalmente surgem nos tubos nessas regiões.

A frequência básica de inspeção é calculada com base na profundidade de geração das correntes parasitas e nas propriedades magnéticas do material, mas também depende de uma resposta adequada para os sinais dos diferentes defeitos artificiais do tubo de calibração padrão ASME (vide Figura 5.5).

De acordo com o Código ASME (1992), Seção V, Ensaios Não Destrutivos, a frequência básica de inspeção do aparelho de Eddy-Current deve ser ajustada de forma que o ângulo de fase do sinal gerado pelos 4 furos cegos de fundo plano (defeitos “G” da Figura 5.5), com profundidade de 20 % da espessura da parede do tubo, esteja de 50° a 120°, no sentido horário em relação ao ângulo de fase do sinal do furo passante, (defeito “C” da Figura 5.5), cujo valor deve ser 40°. Essa diferença entre os ângulos de fase do furo passante e dos 4 furos cegos é conhecida como “espalhamento”, conforme apresentado na Figura 3.9 para o tubo de Inconel 600.

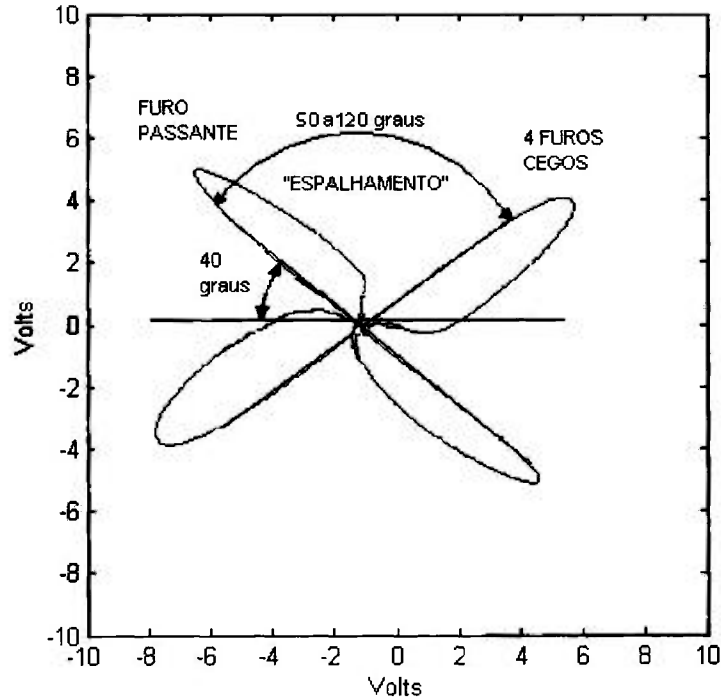


Figura 3.9: “Espalhamento” dos sinais de calibração

A seguinte expressão empírica é muito utilizada na prática para determinar a frequência básica de inspeção em tubos de Geradores de Vapor:

$$f_{120^\circ} = \frac{10 \rho}{t^2} \quad (3.12)$$

onde, f_{120° : frequência de inspeção [Hz]

ρ : resistividade elétrica [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]

t : espessura da parede [pol]

A frequência f_{120° gera um espalhamento de 120° . Além da frequência básica de inspeção, também é utilizada uma segunda frequência que corresponde à metade da frequência básica com o objetivo de explorar a superfície externa do tubo.

O Efeito Pelicular foi pesquisado neste trabalho por meio da realização de inspeções em diversas frequências acima e abaixo da frequência básica de inspeção.

Considerando que um defeito tipo furo cilíndrico passante é um defeito constante em qualquer profundidade, as figuras de Lissajous formadas para esse tipo de defeito em diversas frequências devem ser semelhantes.

Para confirmar esta particularidade da inspeção por Eddy-Current, foram realizadas 5 inspeções no furo passante $\varnothing 1,0$ mm de um tubo cujo material é o aço inoxidável ASTM A-249-316L (tubo InoxASME02), nas frequências de 310 kHz, 330 kHz, 350 kHz, 370 kHz e 400 kHz, cujos resultados são apresentados na Figura 3.10. O intervalo de amostras de cada sinal foi selecionado de forma que o ruído do sinal também fosse apresentado.

A frequência básica de inspeção f_{120° de 350 kHz foi calculada para esse tipo de tubo em função da resistividade elétrica ($83,5 \mu\Omega\cdot\text{cm}$) e da espessura da parede (1,24 mm ou 0,049 pol.). O aparelho de inspeção MIZ-17ET foi calibrado para essa frequência com um ângulo de fase de 40° .

A calibração do aparelho de inspeção também foi realizada de forma a obter valores altos de tensão para a componente da reatância do sinal do furo passante, mesmo comprometendo parte dos sinais dos demais defeitos do tubo devido à saturação dos sinais. O objetivo dessa calibração foi gerar figuras de Lissajous de tamanho apropriado para comparação visual correspondentes ao furo passante nas diversas frequências de inspeção. A calibração, feita para a frequência de 350 kHz, não foi alterada para as demais frequências de modo a não comprometer as comparações das figuras de Lissajous dos defeitos.

As figuras de Lissajous apresentadas não apresentam o formato de um “8” pois o sinal contém um ruído característico da inspeção desse tipo de tubo alterando fortemente a componente da resistência.

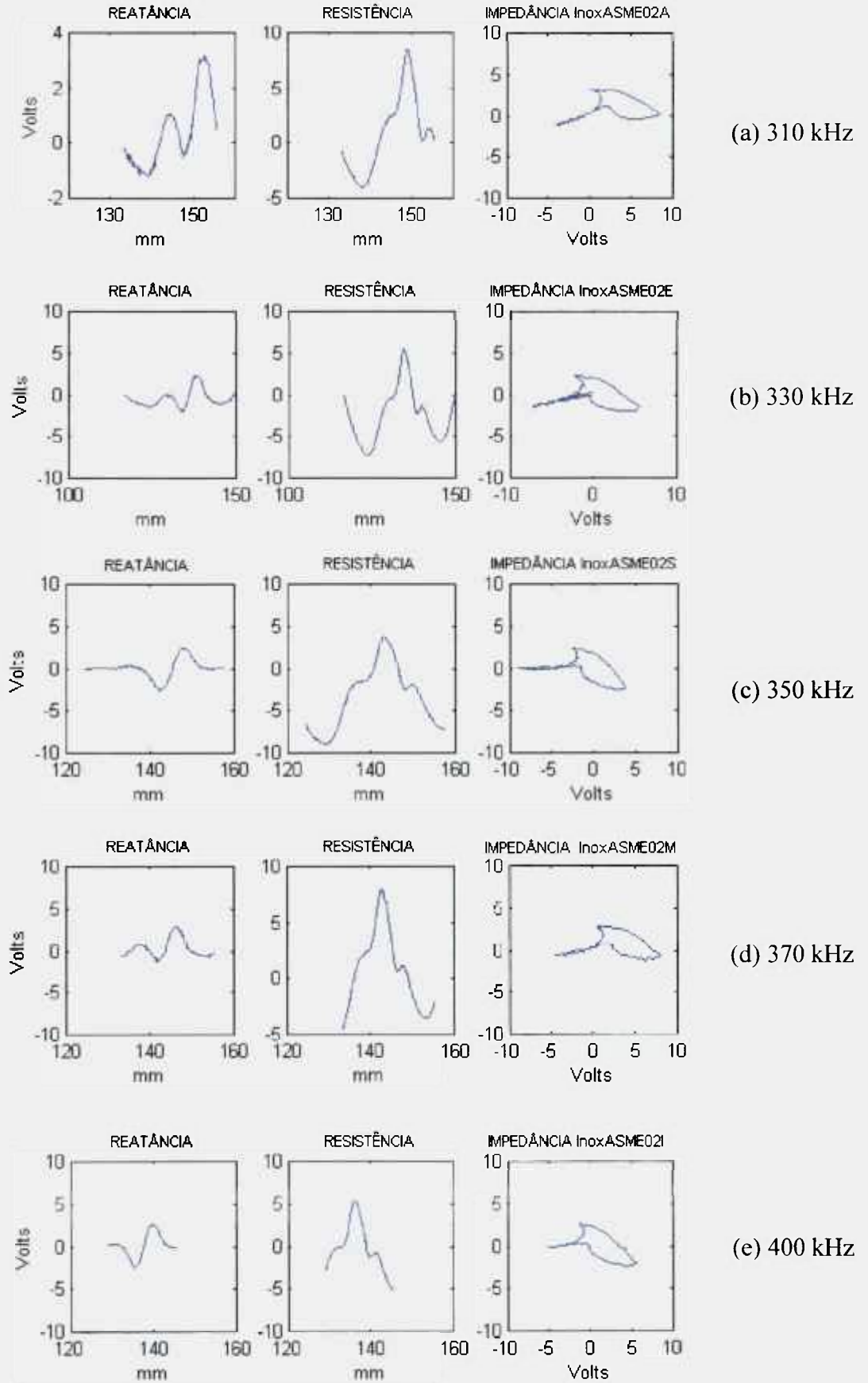


Figura 3.10: Inspeções do furo passante $\varnothing 1,0$ mm do tubo InoxASME02

O tubo ASTM A-249-316L é fabricado a partir de uma tira de chapa retangular que é transformada mecanicamente em um cilindro que é posteriormente fechado longitudinalmente por meio de solda. A solda provoca alterações nas propriedades magnéticas bem como variações dimensionais. O tubo é posteriormente endireitado e o seu diâmetro externo é normalizado. Dessa forma, embora o produto final apresente boa tolerância dimensional para o diâmetro externo, necessária à construção do feixe tubular, há variações significativas na espessura, principalmente na região da solda, provocando ruído no sinal.

A inspeção desse tubo de aço inoxidável é um exemplo típico das dificuldades encontradas pelo inspetor quando o sinal apresenta ruído

Para cada figura de Lissajous apresentada na Figura 3.10 foram medidos o ângulo de fase e a amplitude total do sinal conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 : Frequência, Ângulo de fase e Amplitude Total (InoxASME02)

FREQUÊNCIA DE INSPEÇÃO	MEDIDAS PARA FURO PASSANTE Ø 1,0 MM	
	ÂNGULO DE FASE	AMPLITUDE TOTAL
310 kHz	39 °	8,9 V
330 kHz	39 °	8,7 V
350 kHz	39 °	8,4 V
370 kHz	37 °	8,5 V
400 kHz	40 °	8,7 V

O ângulo de fase foi medido entre a reta que une os pontos extremos da figura e a reta média da resistência que coincide com o ruído do sinal. Esse ruído, característico do tubo inspecionado, é apresentado na Figura 3.11 como uma grande concentração central em forma de “via láctea”. Essa concentração está inclinada nas inspeções realizadas com 310 kHz, 330 kHz, 370 kHz e 400 kHz pois a calibração da aparelhagem não foi alterada para essas frequências de forma a não comprometer a comparação feita.

A amplitude total foi medida entre os extremos de cada figura, de acordo com a técnica usual de medição em inspeções por Eddy-Current.

Observa-se na Tabela 3.1 que o ângulo de fase e a amplitude total são praticamente constantes, pois as figuras de Lissajous apresentadas são de inspeções de furos passantes de diâmetro constante.

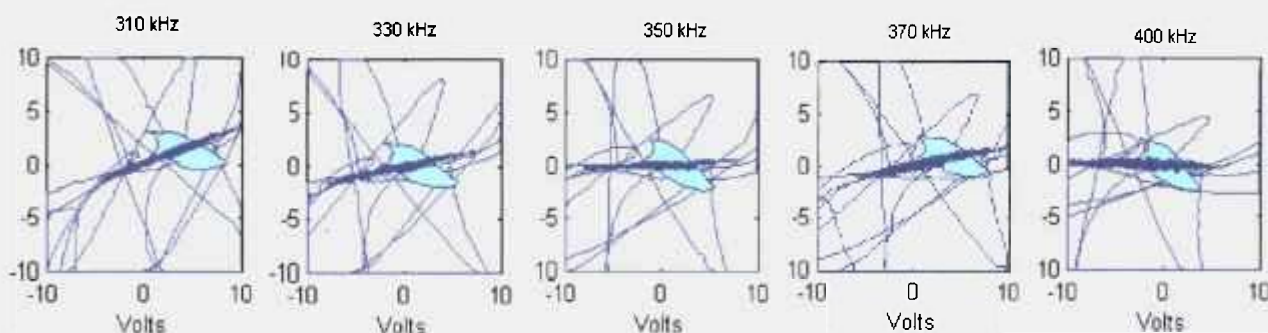


Figura 3.11: Comparação das figuras de Lissajous do furo passante $\varnothing 1,0$ mm do tubo InoxASME02 para diversas frequências de inspeção

3.5 Frequência de amostragem e velocidade de inspeção

Nas inspeções por Eddy-Current, a frequência de amostragem do sinal é ajustada de forma que o menor defeito do padrão ASME (furo passante $\varnothing 1,0$ mm) possa ser observado na tela do aparelho de inspeção e, conseqüentemente, possa ter seu ângulo de fase e sua amplitude medidos.

Neste trabalho, um dos objetivos do processamento dos sinais é explorar detalhes sutis ou sinais pequenos que não são observados nas inspeções, fazendo um “zoom” do sinal. Para atingir tal objetivo, os sinais devem conter um número de amostras apropriado, ou seja, uma resolução temporal adequada.

O aparelho de inspeção utilizado MIZ-17ET, possui uma frequência de amostragem máxima de 8.000 Hz ou seja, 8.000 amostras por segundo quando habilitado

para apenas uma frequência de inspeção. A capacidade máxima do aparelho é de até quatro frequências de inspeção e, nesse caso, a frequência máxima de amostragem é reduzida para 2.000 Hz.

Segundo o manual do aparelho MIZ-17ET (Zetec, 2000), uma frequência de amostragem de 4.000 Hz é apropriada para velocidades da sonda de até 0,3 m/s. As frequências de amostragem disponíveis são compatíveis com as máximas velocidades da sonda que, por sua vez, são determinadas em função de limitações mecânicas da passagem da sonda pelo interior do tubo.

A velocidade da sonda deve ser a maior possível pois segundos gastos a mais na passagem de uma sonda representam horas na inspeção de um feixe tubular composto por milhares de tubos.

A pesquisa da influência da velocidade da sonda nos sinais foi realizada por meio de inspeções no tubo de laboratório InoxDid01 (vide Figura 5.13).

O tubo InoxDid01 é um tubo de aço inoxidável ASTM-A-249-316L, Ø externo 19,05 mm, espessura de parede de 1,24 mm, possui 4 regiões cilíndricas com reduções de diâmetro externo e 11 furos de diâmetros variados, identificados de A a K, com fundos planos ou passantes, localizados na região do tubo sem redução de diâmetro, conforme apresentado na Figura 5.13. A inspeção foi realizada apenas no trecho de 425 mm do tubo onde o diâmetro externo é constante, pois a passagem da sonda pela região com diâmetro externo reduzido exigiria uma nova calibração da aparelhagem.

A frequência de amostragem utilizada foi de 2.000 Hz e a sonda percorreu o tubo com as velocidades de 0,11 m/s, 0,15 m/s e 0,35 m/s gerando os arquivos de sinais apresentados na Figura 3.12. A frequência de inspeção utilizada foi 360 kHz.

Observa-se na Figura 3.12 que os sinais dos defeitos C, E, F, G e K “cliparam” (saturaram), ou seja, atingiram valores maiores que 10 Volts. Isto deve-se ao fato de serem defeitos com grande perda de material sendo que o defeito G, para os padrões de inspeção por correntes parasitas, é um defeito de grandes proporções (furo passante com um diâmetro de 4,8 mm). Caso a aparelhagem fosse calibrada para que as amplitudes de todos os sinais ficassem dentro da faixa de - 10 V a + 10 V, o sinal H, que corresponde a um defeito muito pequeno (furo não passante Ø 1,0 mm de fundo cônico cuja profundidade máxima é de 50 % da espessura do tubo), não teria uma figura de Lissajous visível.

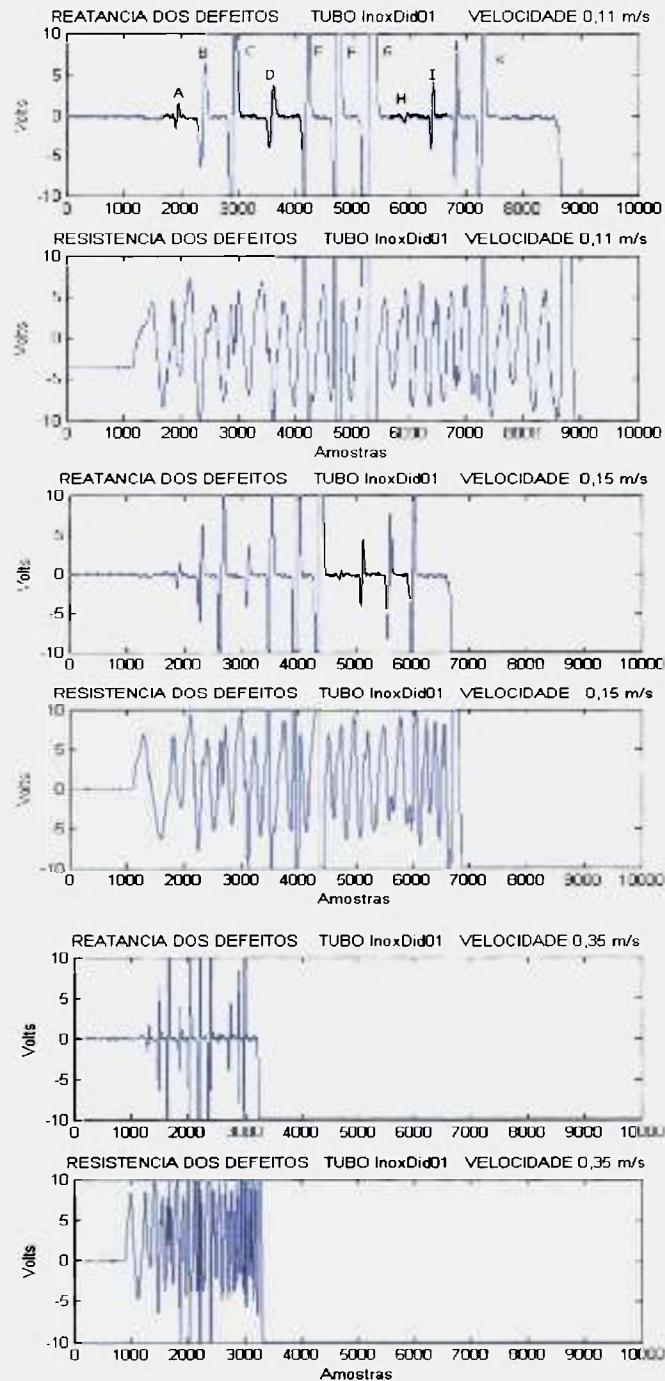


Figura 3.12: Inspeções no tubo InoxDid01 em três velocidades

A Figura 3.13 apresenta as figuras de Lissajous dos defeitos A, H e I nas três velocidades utilizadas. O defeito A é um furo não passante de fundo plano $\varnothing$ 2,0 mm e profundidade de 40 % da espessura da parede do tubo (0,496 mm). Os defeitos H e I são furos não passantes com $\varnothing$ 1,0 mm e $\varnothing$ 2,0 mm respectivamente, com profundidade de 50 % da espessura da parede do tubo (0,62 mm).

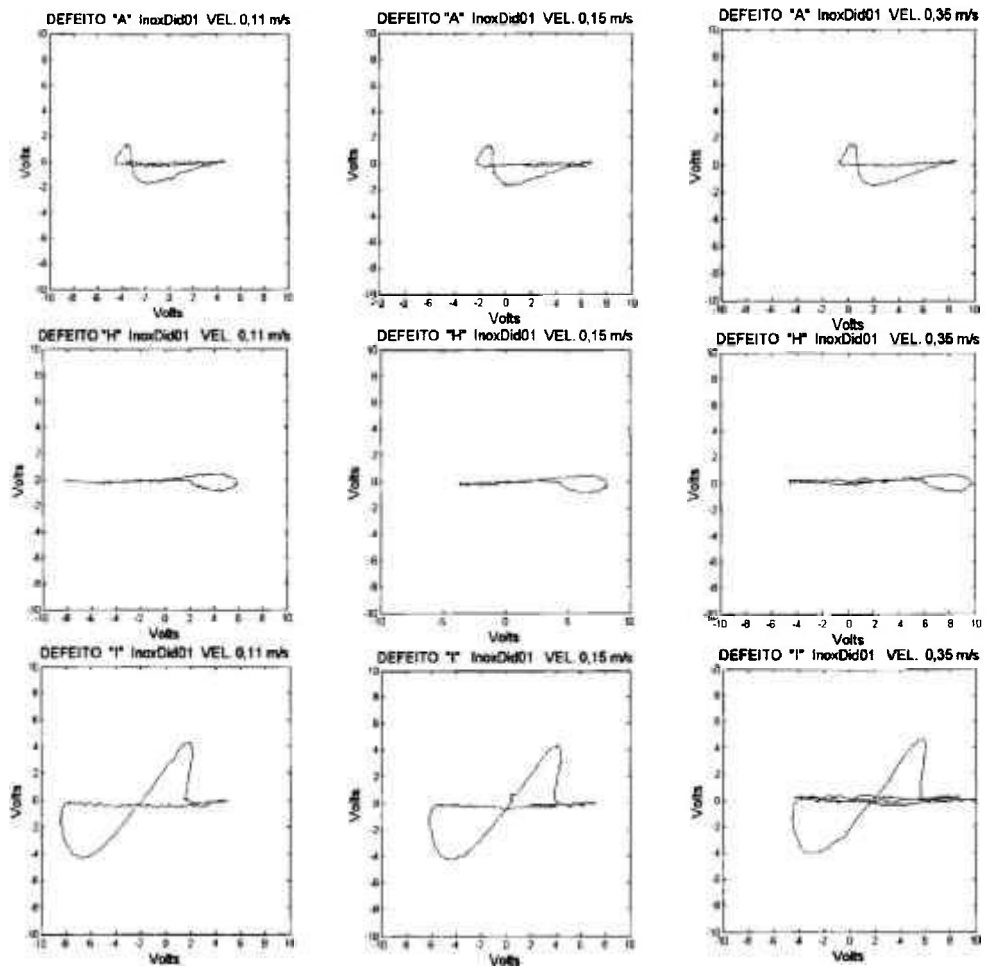


Figura 3.13: Defeitos A, H e I do tubo InoxDid01 em três velocidades

As velocidades de inspeção v_i foram obtidas manualmente e determinadas pela seguinte relação:

$$v_i = l \cdot f_a / n_a \quad (3.13)$$

onde, l : distância percorrida pela sonda (0,425 m)

f_a : frequência de amostragem (2.000 Hz)

n_a : número de amostras

A resolução do sinal da inspeção, ou seja, a distância percorrida pela sonda entre duas amostras consecutivas será, portanto,

$$\Delta l = \frac{v_i}{f_a} \text{ (mm)} \quad (3.14)$$

Do acima exposto, conclui-se que as variações de velocidade da sonda, que são consequência da tração manual da sonda pelo interior do tubo, utilizada neste trabalho, não interferem nas figuras de Lissajous resultantes.

3.6 Calibração em inspeções por Eddy-Current

A calibração da aparelhagem de inspeção por Eddy-Current deve ser realizada por meio da passagem da sonda de inspeção pelo interior de um tubo padrão, com defeitos artificiais especificados pelo Código ASME (1992) e apresentado no Capítulo 5 (Figura 5.5). Os sinais resultantes devem ter as características a seguir descritas.

A tela do aparelho de inspeção é dividida em 4 quadrantes, conforme apresentado na Figura 3.14 e, de acordo com o Código ASME (1992), as figuras de Lissajous devem iniciar pelo segundo quadrante ou pelo terceiro quadrante e seguir a seqüência 1, 2, 3 e 4. O sinal apresentado na Figura 3.14 corresponde aos 4 furos cegos de fundo plano com profundidade de 25 % da espessura da parede do tubo de Inconel 600.

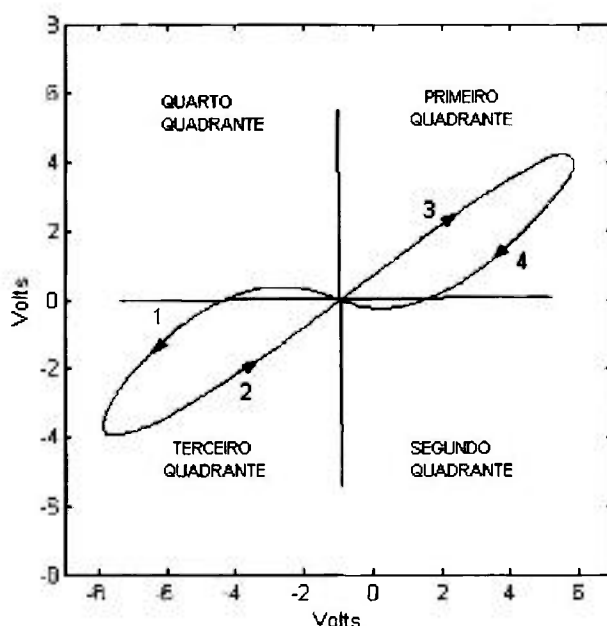


Figura 3.14: Seqüência de formação de um sinal de Eddy-Current para o tubo de Inconel 600

Na Figura 3.14 observa-se que o sinal do defeito inicia de fato no quarto quadrante porém a sua evolução se dá efetivamente e de forma correta no terceiro quadrante.

Ainda segundo a mesma referência, a sensibilidade do aparelho de Eddy-Current deve ser ajustada para produzir um sinal mínimo pico a pico com 80 % da apresentação horizontal da tela ajustada para 1 Volt por divisão.

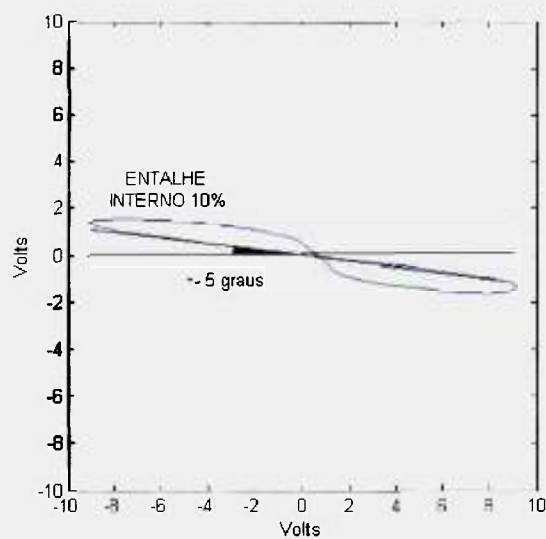


Figura 3.15: Sinal do entalhe circunferencial interno com 10% de profundidade do tubo LataoASME02

O sinal do entalhe circunferencial interno do tubo padrão ASME, cuja profundidade é de 20 % da espessura da parede do tubo, deve ser ajustado de forma que fique aproximadamente a 5° do eixo horizontal da tela, conforme apresentado na Figura 3.15. Esse sinal corresponde ao entalhe circunferencial interno do tubo LataoASME02.

A linha média do sinal resultante do ruído deve ter uma inclinação máxima de 5° a 10°, conforme apresentado na Figura 3.16. Esse sinal corresponde ao furo passante Ø 2,0 mm do tubo InoxDid01.

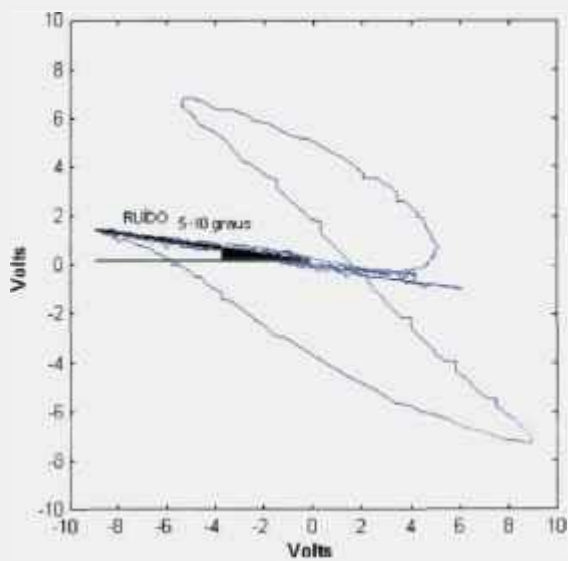


Figura 3.16: Indicação horizontal do ruído para o tubo InoxDid01

No processo de calibração, ajustes são feitos para que cada defeito do padrão ASME gere uma figura de Lissajous cujo ângulo de fase atenda à curva de calibração apresentada na Figura 3.17.

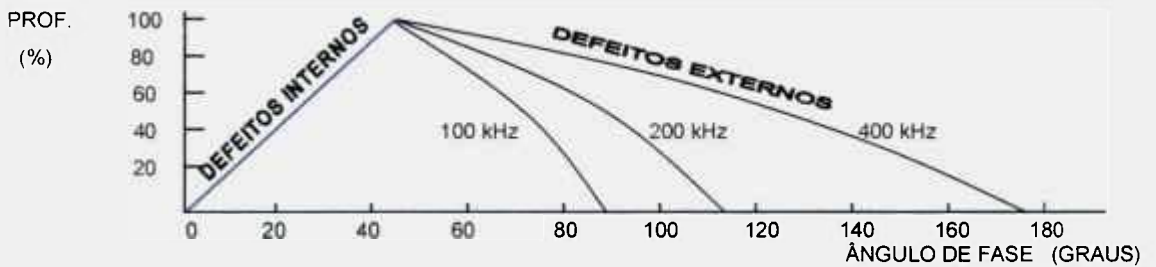


Figura 3.17: Curvas de Calibração para o tubo de Inconel 600 para diferentes frequências de inspeção

Segundo a curva de calibração, para defeitos internos (entalhes circunferenciais ou furos cegos internos), os ângulos de fase variam de 0° a 40° e são diretamente proporcionais à profundidade. O furo passante corresponde a 40° de ângulo de fase. Os defeitos externos (furos cegos e entalhe superficial externo), têm ângulos de fase que variam de 40° a 180° e são inversamente proporcionais à profundidade.

Essa curva de calibração foi obtida para o tubo de Inconel 600, cuja frequência básica de inspeção é 400 kHz. A Figura 3.17 também apresenta as curvas de calibração para 1/2 da frequência básica (200 kHz) e 1/4 da frequência básica.

A Figura 3.18 apresenta os sinais para o tubo de Inconel 600 (InoxDid03).

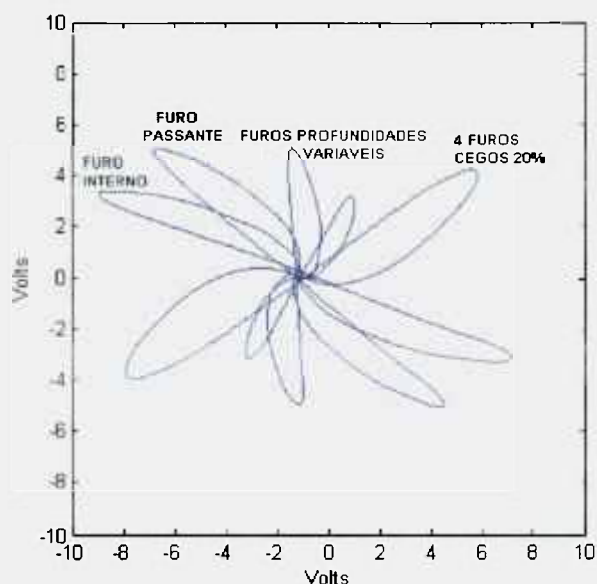


Figura 3.18: Sinais de calibração para o tubo de Inconel 600

4. O ESTADO DA ARTE NA LOCALIZAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE DEFEITOS EM TUBOS

Atualmente os inspetores de Eddy-Current determinam a existência, a localização, classificam e dimensionam os defeitos da seguinte forma:

- verificam no sinal temporal da reatância as indicações de tensão acima do ruído para determinar a existência e a localização do defeito; e,
- classificam e dimensionam os defeitos interpretando as figuras de Lissajous, geradas no plano da impedância, comparando os ângulos de fase dessas figuras com os ângulos de fase das figuras padronizadas, previamente geradas na calibração.

As comparações muitas vezes provocam dúvidas nos inspetores quanto à existência de um defeito, seu tipo e suas dimensões, porque os sinais estão corrompidos por ruídos, o que leva freqüentemente a tamponamentos desnecessários de tubos. Além disso, as conclusões dos diagnósticos muitas vezes são comprometidas quanto à repetibilidade e à confiabilidade, pois dependem unicamente do julgamento humano, podendo não ser sistemáticas. É comum obter para uma inspeção resultados diferentes para inspetores diferentes ou, até mesmo, resultados diferentes para um mesmo inspetor.

Possíveis soluções para o problema exposto, baseadas em redes Fuzzy-Neurais, utilizando o ângulo de fase e o raio do centro de gravidade da pétala da figura de Lissajous, são propostas por Yan *et al.* (1995 e 1996). Nesses trabalhos é utilizado um banco de dados de inspeções fornecido pelo ORNL (Oak Ridge National Laboratory). A proposta oferece resultados satisfatórios para defeitos volumétricos ou bi-dimensionais, porém necessita de mais pesquisa e desenvolvimento para a análise de bancos de dados maiores bem como melhorias na confiabilidade do processo de decisão, na detecção e no dimensionamento de defeitos.

Upadhyaya *et al.* (1997, 1998 e 1999) propõem o uso de um sistema de interpretação de sinais baseado em Transformadas de Wavelets e Lógica Fuzzy, que utiliza um banco de dados fornecido pelo EPRI (Electric Power Research Institute) NDE (Non Destructive Examination) Center e que considera, no processo de decisão, o ângulo de fase

do sinal do defeito medido em 3 frequências. Esse trabalho tem como objetivo o tratamento dos principais tipos de defeitos encontrados em feixes tubulares de Geradores de Vapor tais como IGA – *Intergranular Attack* (Corrosão Intergranular), SCC – *Stress Corrosion Cracking* (Corrosão sob Tensão), PIT – *Pitting* (Desgaste Localizado) e danos na região das placas de suporte dos tubos. O trabalho apresenta bons resultados porém não parte de um banco de dados próprio e não considera as informações que as figuras de Lissajous podem fornecer para o diagnóstico dos defeitos.

Um dos problemas encontrados por Upadhyaya *et al.* (1997, 1998 e 1999) foi a utilização de dados de campo fornecidos pelo EPRI causando dispersão nos seus trabalhos de análise e processamento de sinais devido à inexistência de dados de defeitos conhecidos. Na área de processamento de sinais, a linha adotada seguiu ultimamente para a utilização simples da técnica do “Zero-Crossing”, que é a localização dos pontos de inflexão do sinal original.

Wilson *et al.* (1998), apresentam as bases para o desenvolvimento de um sistema Neuro-Fuzzy aplicado à análise da performance de GV's com tubos tamponados como consequência de inspeções de Eddy-Current onde abordam a influência do aspecto subjetivo no processo de decisão quanto ao tamponamento de tubos.

Chen *et al.* (1998), apresentam uma proposta de utilização de Transformadas de Wavelets, aplicadas ao tratamento da componente da reatância dos sinais dos defeitos de tubos de Geradores de Vapor, com o objetivo de remover os ruídos e o efeito da flutuação da sonda (“Lift-off”). Segundo esses autores, a componente DC do sinal contém o efeito do “Lift-off” e os detalhes em frequência da decomposição do sinal contêm os sinais dos defeitos bem como o ruído de alta frequência. Os autores expõem a necessidade de tratar o sinal de forma a retirar todas as componentes em frequência indesejáveis e que dificultam a detecção de defeitos aumentando o SNR (Relação Sinal Ruído) e facilitando o emprego de outras técnicas de reconhecimento. A reatância dos sinais é decomposta em vários níveis com as Transformadas de Wavelet Daubechies 3 e 10. A recomposição dos sinais é feita após a retirada de coeficientes das diversas frequências de decomposição. Os autores apresentam resultados satisfatórios para o sinal de um defeito com profundidade maior que 60% de um tubo de Inconel 600.

Joubert *et al.* (2001), apresentam um sistema de detecção e localização de defeitos internos e externos, em tubos de Inconel 600, com bobinas radiais e axiais, cujos sinais são processados por meio de Transformadas de Wavelets Contínuas para detectar pequenos

defeitos e permitir a localização espacial através de um mapa binário. O processamento é combinado com uma análise de máxima semelhança que visa aumentar o desempenho na detecção e permitir a localização automática de defeitos. São utilizados 4 tubos com defeitos artificiais internos e externos produzidos por eletro-erosão orientados axial ou circunferencialmente e com profundidades variando de 10 % a 100 % da espessura da parede do tubo. As Transformadas de Wavelets se aplicam bem à detecção de defeitos com profundidades maiores que 20% da espessura da parede do tubo, porém defeitos menores são precariamente detectados pois têm sinais com amplitudes menores que o ruído. A aplicação de Transformadas de Wavelets no processamento de sinais com ruído e que apresentam variações abruptas, característica típica dos sinais de Eddy-Current, é comprovada neste trabalho, porém somente com a utilização da função protótipo wavelet Morlet e sem especificar qual wavelet da família Morlet foi utilizada. Além disso, o artigo trata apenas da localização de defeitos sem relacionar as características do sinal com as dimensões do defeito.

Li *et al.* (2002), propõem um método de fusão de componentes da reatância de sinais obtidos em múltiplas frequências e tratados com Transformadas de Wavelets. Os autores utilizam dois corpos de prova de material ferroso em forma de placa retangular, com ranhuras transversais nas duas superfícies e com dimensões não informadas. Foi utilizada uma sonda absoluta e um dispositivo mecânico para movimentação da sonda. Os sinais gerados foram adquiridos em um PC. Apesar de não terem sido utilizados tubos, esse trabalho é de interesse devido ao uso da função Wavelet Daubechies 10 devido à sua regularidade para decompor o sinal e remover o efeito de “Lift-off” ou flutuação da sonda. Posteriormente, o sinal é recomposto por Transformadas de Wavelets Discretas Inversas e decomposto novamente em 5 níveis de frequência com a Transformada de Wavelet Daubechies 3, que apresenta uma boa característica de localização espaço-frequência. Essas escolhas foram feitas pelos autores por apresentarem bons resultados. Foram utilizadas múltiplas frequências para explorar o efeito superficial das correntes parasitas e determinar a profundidade dos defeitos. A fusão de dados unidimensionais é feita após a decomposição e recomposição dos sinais segundo 4 critérios: seleção da amplitude máxima, média, média ponderada e combinação de sinais de diferentes frequências.

Grman *et al.* (2001), utilizam Transformadas de Wavelets no estudo das componentes da resistência e da reatância de sinais de Eddy-Current, obtidos na inspeção de um dispositivo experimental que simula os principais elementos encontrados nos feixes

tubulares de Geradores de Vapor tais como placa suporte, curva e espelho, além de defeitos artificiais. A localização de defeitos é realizada pela determinação dos máximos coeficientes de escala e posição da Transformada de Wavelet que melhor se acopla aos sinais experimentais adquiridos. Segundo os autores, a Transformada de Wavelet Gaussiana é a mais apropriada para essa finalidade. É utilizado um algoritmo para distinguir pseudo máximos de máximos efetivos. Os autores propõem a utilização dos coeficientes de escala e posição para classificar os sinais e relacioná-los com os elementos dos feixes tubulares (curvas, placa e espelho). As análises apresentadas oferecem resultados satisfatórios mas específicos para o dispositivo utilizado. Sinais reais têm os resultados afetados pelo movimento de “Lift-off” da sonda e é cogitada a remoção do ruído antes da utilização do algoritmo proposto.

A análise dos trabalhos publicados na área de diagnóstico de defeitos por meio de inspeções por Eddy-Current, leva às seguintes conclusões:

- a utilização de Redes Neurais, por se tratar de um treinamento supervisionado, embora promissora, necessita de uma forte base de conhecimento fundamentada em experimentos realizados com objetivos específicos;
- a Transformada de Wavelet é uma ferramenta importante para o processamento de sinais de Eddy-Current;
- o ruído nos sinais afeta significativamente o processo de decisão para a localização e o dimensionamento de defeitos, podendo inviabilizar a inspeção se não for removido;
- a Lógica Nebulosa ou Fuzzy é uma ferramenta aplicável ao processo de decisão;
- somente Yan *et al.* (1995) sugerem a utilização de figuras de Lissajous com o objetivo de classificar e dimensionar defeitos porém não evoluem nesse sentido; e,
- a aquisição de sinais de inspeções em condições controladas de laboratório, bem como a interação com inspetores de correntes parasitas, são vitais para a formação de uma base de conhecimento sólida que direcione novas metodologias.

Com base nessas conclusões, este trabalho de pesquisa é baseado nas seguintes premissas:

- domínio da técnica de inspeção por Eddy-Current através da interação com inspetores e empresas dessa especialidade bem como o acompanhamento de inspeções nos Geradores de Vapor da Usina Nuclear de Angra I;
- criação de um banco de dados de sinais de inspeções realizadas em tubos experimentais de laboratório e em tubos de campo;

- utilização de Transformadas de Wavelets para o pré-processamento de sinais visando a remoção dos diversos tipos de ruídos;
- utilização das figuras de Lissajous como fonte de informações para a extração de características que permitam a classificação e o dimensionamento de defeitos; e,
- utilização da lógica Fuzzy como auxílio ao processo de decisão na classificação e no dimensionamento de defeitos.

As contribuições originais deste trabalho são:

- exploração experimental de novas características dos sinais de Eddy-Current no plano da impedância (aberturas e amplitudes das figuras de Lissajous) além da sistematização na determinação do ângulo de fase, característica tradicional atualmente utilizada;
- desenvolvimento e teste de uma metodologia baseada em Transformadas de Wavelets para a remoção do ruído do sinal proveniente do material;
- criação de programas computacionais para automatizar a visualização e o processamento de sinais; e,
- criação de uma máquina de inferência Fuzzy que organiza todo o conhecimento oriundo dos resultados experimentais, bem como agrega facilmente novos conhecimentos e contribui no processo de decisão, auxiliando os inspetores de Eddy-Current no diagnóstico de defeitos volumétricos em tubos de Geradores de Vapor.

5. GERAÇÃO, AQUISIÇÃO E VISUALIZAÇÃO DE SINAIS EM INSPEÇÕES POR EDDY-CURRENT

Para validar a metodologia proposta neste trabalho, foram realizadas medidas experimentais gerando um conjunto confiável de dados correlacionados com defeitos conhecidos. Optou-se por gerar experimentalmente os próprios dados para permitir um domínio completo do tema.

A base experimental é composta por 107 arquivos de sinais gerados e adquiridos em inspeções realizadas em tubos de diferentes materiais, com defeitos artificiais especialmente produzidos com finalidades de calibração e pesquisa ou em tubos retirados de trocadores de calor. Esses arquivos de sinais foram utilizados na concepção de um sistema de detecção, localização, classificação e dimensionamento de defeitos.

Os sinais foram gerados em três aparelhos de inspeção por correntes parasitas: MIZ-40, Testex Hodking e MIZ-17ET. Os sinais gerados por esses aparelhos foram convertidos em uma placa analógico/digital A/D National DAQ Card 700, interface PC MC IA e foram adquiridos através do programa LabVIEW que salva os dados em matrizes no formato de texto (*.txt). Posteriormente esses sinais são lidos pelo Módulo de Leitura e Visualização de Sinais (MLV), que é um programa desenvolvido pelo autor em MATLAB, descrito no item 5.4, e podem ser visualizados na tela de um PC.

Um esquema do hardware utilizado é apresentado na Figura 5.1.

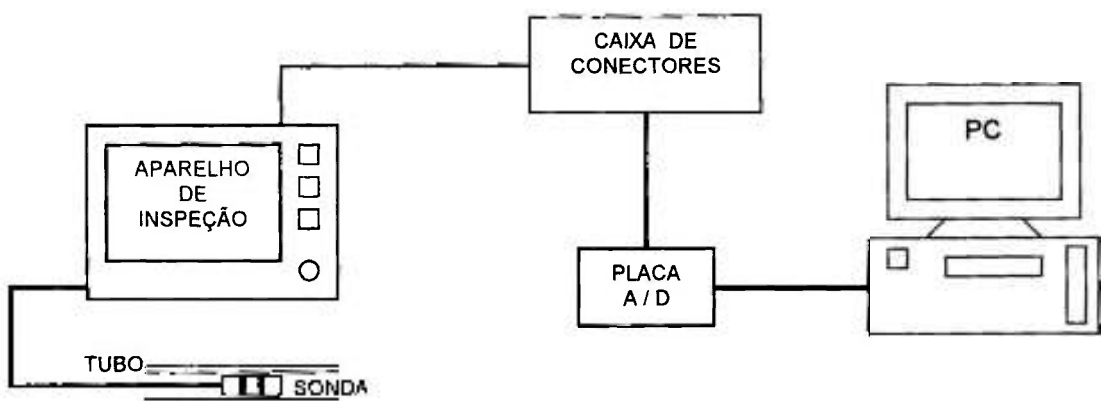


Figura 5.1: Hardware utilizado

A seguir serão apresentados os **aparelhos** e os tubos utilizados nesta pesquisa, os arquivos de sinais adquiridos com os **respectivos** parâmetros de aquisição e a descrição do MLV.

5.1 Aparelhos utilizados

Neste trabalho, os primeiros sinais de inspeções por Eddy-Current foram obtidos através de contatos com o CETRE (Centro de Treinamento) da ABENDE (Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos), onde foi utilizado o aparelho Tektronix 5111A, apresentado na Figura 5.2. Nessa oportunidade, constataram-se as dificuldades experimentadas pelo inspetor na interpretação das figuras de Lissajous geradas na tela do aparelho. Por ser antigo e freqüentemente utilizado para fins didáticos pelo CETRE, o aparelho Tektronix 5111A da ABENDE foi descartado como meio apropriado para a aquisição de dados para pesquisa.



Figura 5.2: Aparelho de inspeção de Eddy-Current Tektronix 5111A

Por intermédio da ABENDE, chegou-se à empresa de inspeção Brasitest que possui o aparelho MIZ-40 da Zetec apresentado na Figura 5.3. A Brasitest é associada à

REM, representante da Zetec no Brasil. Na Brasitest foram realizadas inspeções em tubos de latão padrão ASME com o objetivo de adquirir dados de forma digital.



Figura 5.3: Aparelho de inspeção de Eddy-Current MIZ-40

Primeiramente buscou-se o acesso a dados digitais através da interface serial RS-232 do aparelho MIZ-40 conectando diretamente o aparelho de Eddy-Current ao micro computador. Os dados seriam lidos de uma maneira mais lenta, por programas tais como Delphy ou Visual Basic, podendo não sair em tempo real, mas esse problema seria contornado pela capacidade de armazenamento de dados dos programas. No entanto, devido a problemas de configuração, não foi possível adquirir os dados pela porta serial do aparelho MIZ-40.

A obtenção dos dados pela saída GPIO (General Purpose Input-Output) também foi tentada não se obtendo sucesso nessa saída rápida de dados em paralelo devido a dificuldades nas ligações do cabo.

Finalmente, foi obtido sucesso na interface entre o MIZ-40 e o PC conectando-se um cabo de vídeo na saída BNC do aparelho. Após a conversão para cabo ID, o aparelho MIZ-40 foi conectado a um computador através de uma placa conversora analógico/digital de aquisição de dados.

A utilização do aparelho MIZ-40 de propriedade da Brasitest foi importante para a concepção do hardware necessário para a geração e aquisição de sinais de ensaios de Eddy-

Current. No entanto, por ser de uso freqüente em inspeções realizadas em todo o Brasil por essa empresa, a utilização desse aparelho para fins de pesquisa tornou-se inviável.

Paralelamente aos contatos com a Brasitest, foram feitos contatos com a empresa de inspeção Interativa, que possui o aparelho Testex Hodking produzido pela empresa Eddy Current Technology Incorporated. Nesse aparelho, que pode operar com freqüências de inspeção de 55 Hz a 4 MHz, foram feitas inspeções em tubos novos ou usados, de latão ou aço inoxidável, utilizando o mesmo hardware utilizado com o aparelho MIZ-40. A utilização do aparelho de inspeção da Interativa para pesquisa também foi comprometida por problemas de disponibilidade do aparelho.

Para a solução definitiva do problema de disponibilidade de aparelhagem para geração de dados de inspeções de Eddy-Current, foi selecionado para aquisição pelo IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), o aparelho de inspeção MIZ-17ET produzido pela Zetec. Este aparelho foi utilizado na obtenção da maior parte dos arquivos que compõem o banco de dados próprio utilizado neste trabalho e é apresentado na Figura 5.4 com a caixa de conectores, a placa A/D, o Lap Top, a sonda de inspeção e o tubo de Inconel 600.



Figura 5.4: Aparelhagem utilizada

O aparelho MIZ-17ET pode operar com até 4 canais simultaneamente com 4 frequências de inspeção variando de 100 Hz a 1 Mhz. A frequência de amostragem é de até 8.000 amostras/s. Pode utilizar uma sonda absoluta ou duas diferenciais. A tela apresenta a resistência, a reatância e a impedância (figuras de Lissajous) e a saída analógica (DB-15) tem gravação de dados e comando por voz.

5.2 Tubos experimentais fabricados

Visando a geração e a aquisição de sinais, foram produzidos por usinagem e eletroerosão defeitos artificiais em tubos de latão almirantado ASTM B-111-687, Ø 19,05 mm, Ø 19,05 mm, espessura 1,24 mm (BWG 18) e em tubos de aço inoxidável ASTM B-163 600 (Inconel 600), Ø 22,22 mm, espessura 1,30 mm (BWG 18).

Também foram utilizados 9 tubos de aço inoxidável ASTM A-249-316L, Ø 19,05 mm, espessura 1,65 mm (BWG 16) extraídos de trocadores de calor.

Cada tubo foi identificado por um código alfanumérico formado por três campos referentes ao material, ao objetivo e ao número do tubo.

No campo referente ao material do tubo são utilizados os nomes “Latao” ou “Inox”: o material “Latao” é ASTM B-111-687 e o material “Inox” é ASTM A-249-316L ou ASTM B-163 600 (Inconel 600).

No campo referente à finalidade do tubo utiliza-se “ASME” quando o tubo é um padrão de inspeção especificado de acordo com o Código ASME, Seção V, Artigo 8, Apêndice 1, “Did” quando a finalidade do tubo é a exploração da relação sinal-defeito, e “Troc” quando se trata de um tubo extraído de um trocador de calor.

O terceiro campo é o número do tubo composto por 2 dígitos. A seguir são apresentados os desenhos e as descrições dos tubos utilizados bem como os defeitos.

5.2.1 Tubos de latão almirantado

5.2.1.1 Tubo LataoASME01 (Figura 5.5)

O tubo LataoASME01 é um padrão ASME para calibração, de latão almirantado ASTM B-111-687, $\varnothing$ 19,05 mm, espessura 1,50 mm (BWG 16), com furos cegos (não passantes) de fundo plano externos, um furo passante e entalhes circunferenciais internos e externos, produzido por usinagem de acordo com as especificações do código ASME.

5.2.1.2 Tubo LataoASME02 (Figura 5.6)

O tubo LataoASME02 é um padrão ASME para calibração com 3 defeitos adicionais inseridos entre os 8 defeitos do padrão ASME usual e foi produzido por usinagem.

5.2.1.3 Tubo LataoASME03 (Figura 5.5)

O tubo LataoASME03 é um padrão ASME para calibração produzido por usinagem e eletroerosão.

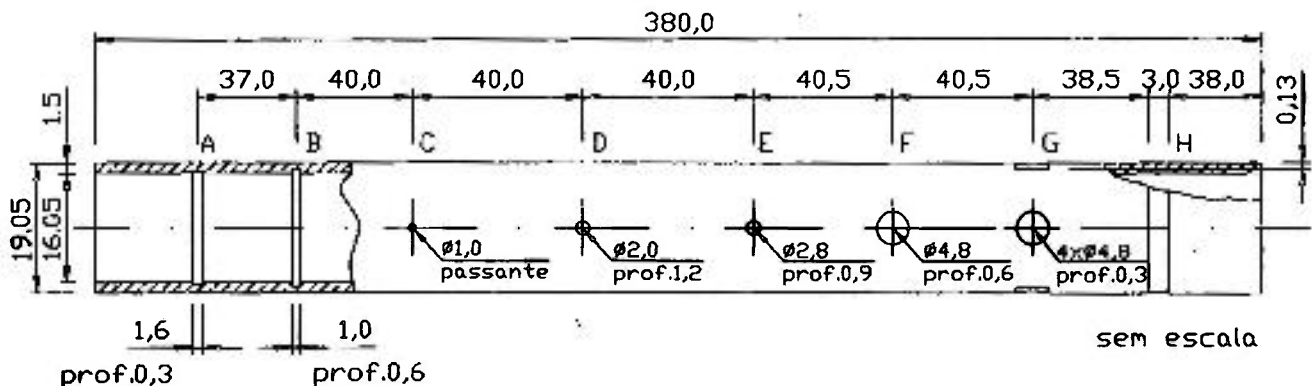


Figura 5.5: Tubos LataoASME 01, 03 e 04

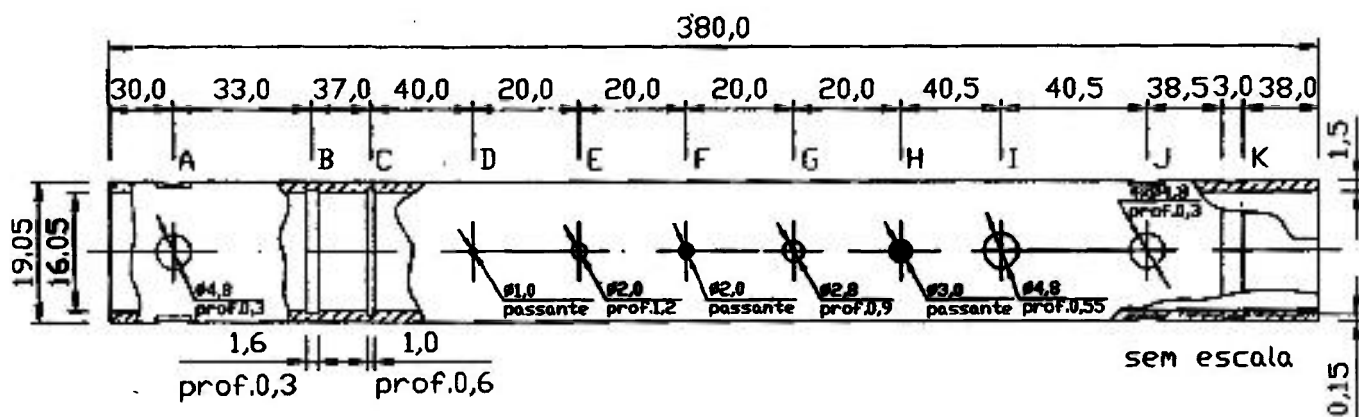


Figura 5.6: Tubo Latao ASME 02

5.2.1.4 Tubo LataoASME04 (Figura 5.5)

O tubo LataoASME04 também é um padrão ASME para calibração produzido por usinagem e eletroerosão.

5.2.1.5 Tubo LataoDid01 (Figura 5.7)

O LataoDid01 é um tubo de latão almirantado ASTM B-111-687, Ø 19,05 mm, espessura 1,50 mm (BWG 16), com 7 entalhes circunferenciais externos de formas variadas, produzido por usinagem.

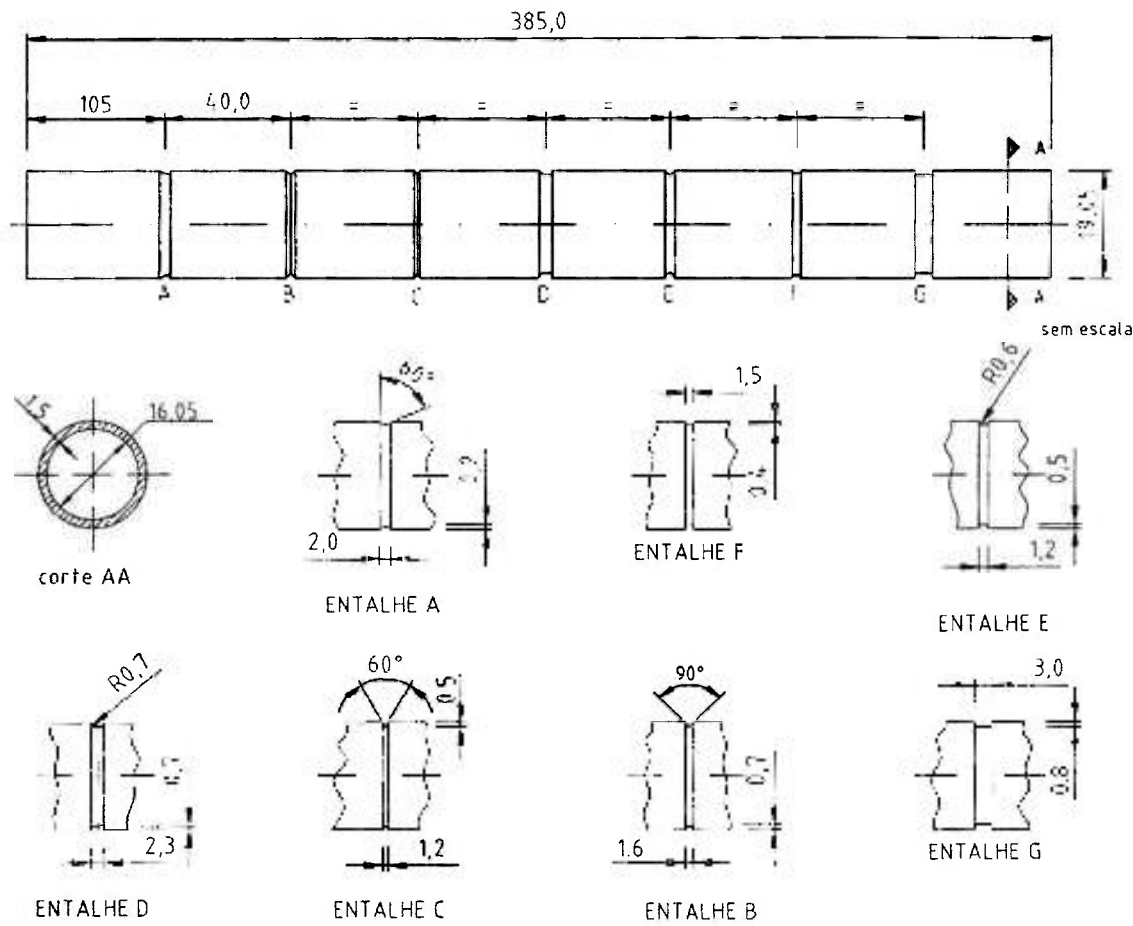


Figura 5.7: Tubo LataoDid01

5.2.1.6 Tubo LataoDid02 (Figura 5.8)

O tubo LataoDid02 é um tubo de latão almirantado ASTM B-111-687, Ø 19,05 mm, espessura 1,50 mm (BWG 16), com 9 furos cegos (não passantes) de Ø 2,0 mm, com profundidades variando de 10 % a 90 % da espessura da parede do tubo (0,15 mm a 1,35 mm com incrementos de 0,15 mm), produzido por usinagem.

5.2.1.7 Tubo LataoDid03 (Figura 5.9)

O tubo LataoDid03 é um tubo de latão almirantado ASTM B-111-687, Ø 19,05 mm, espessura 1,50 mm (BWG 16), com 4 furos cegos (não passantes) de Ø 1,0 mm, Ø 2,0 mm, Ø 2,8 mm e Ø 4,8 mm, todos com profundidade de 50 % da espessura da parede do tubo (0,75 mm), produzido por usinagem.

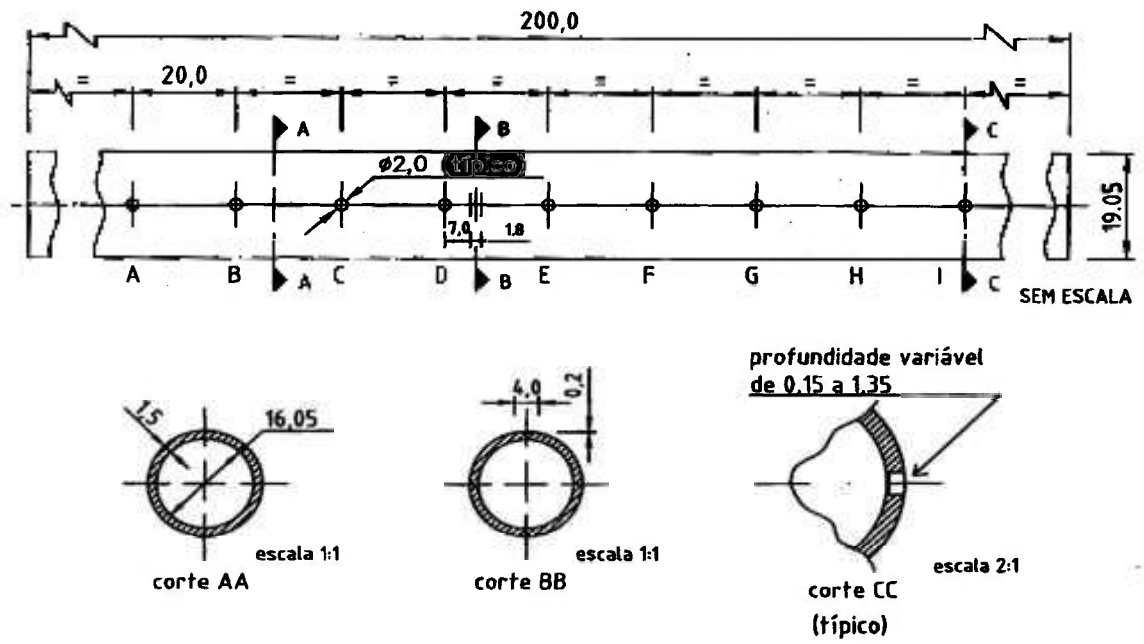


Figura 5.8: Tubo LataoDid02

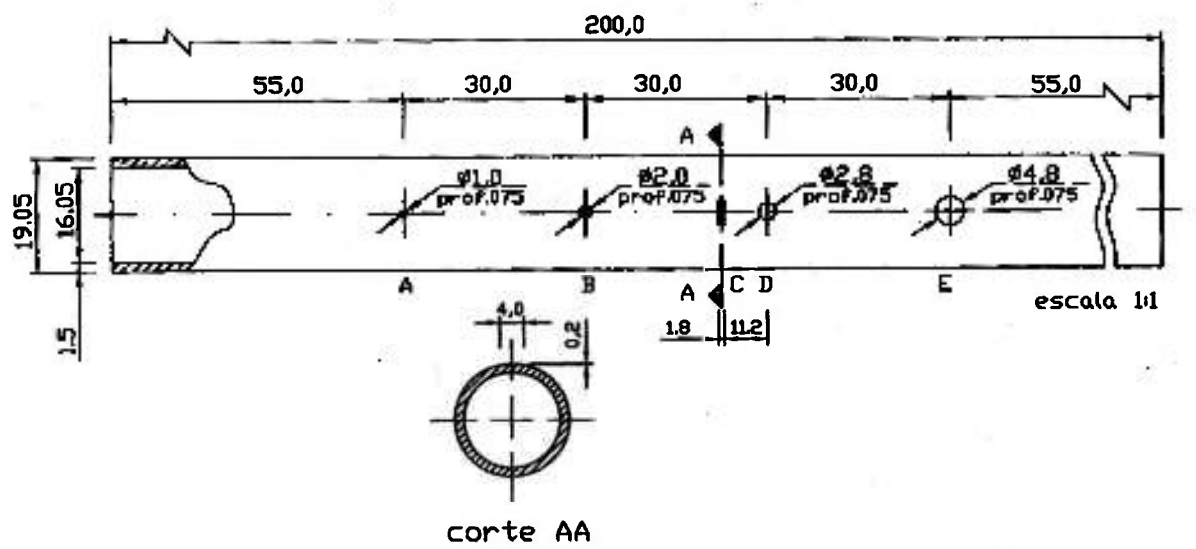


Figura 5.9: Tubo LataoDid03

5.2.1.8 Tubo LataoDid04 (Figura 5.10)

O tubo LataoDid04 é um tubo de latão almirantado ASTM B-111-687, $\varnothing$ 19,05 mm, espessura 1,50 mm, com duas grandes reduções de espessura, uma simétrica e curva e a outra assimétrica e cônica e 3 furos cegos (não passantes) oblongos com 15,0 mm de comprimento e $\varnothing$ 2,0 mm, $\varnothing$ 2,8 mm e $\varnothing$ 4,8 mm, todos com profundidade de 50 % da espessura da parede do tubo (0,75 mm), produzido por usinagem.

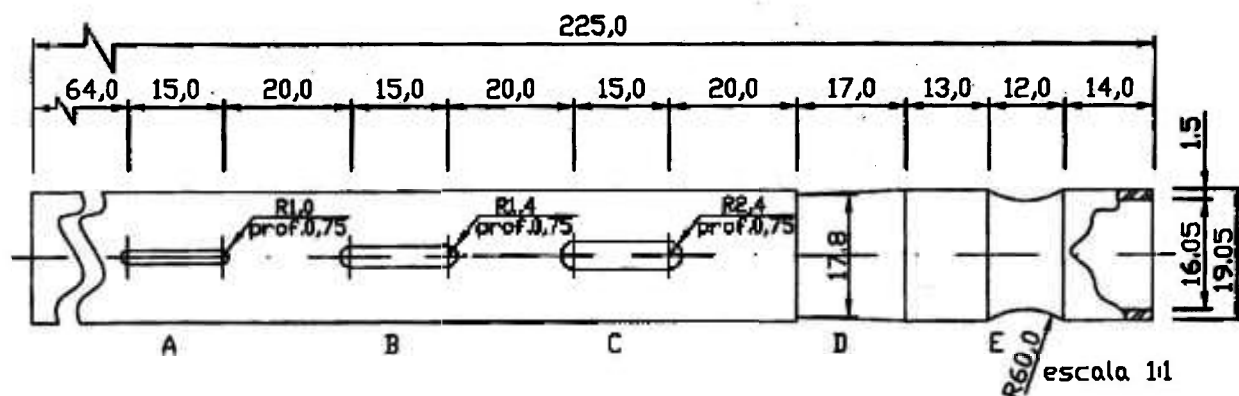


Figura 5.10: Tubo LataoDid04

5.2.2 Tubos de aço inoxidável

5.2.2.1 Tubo InoxASME01 (Figura 5.11)

O tubo InoxASME01 é um tubo padrão ASME para calibração de aço inoxidável ASTM A-249-316L, $\varnothing$ 19,05 mm, espessura 1,50 mm (BWG 16), com furos cegos (não passantes) de fundo plano externos, um furo passante e entalhes circunferenciais internos e externos produzido por eletroerosão e usinagem.

5.2.2.2 Tubo InoxASME02 (Figura 5.11)

O tubo InoxASME02 é um tubo padrão ASME produzido somente por usinagem.

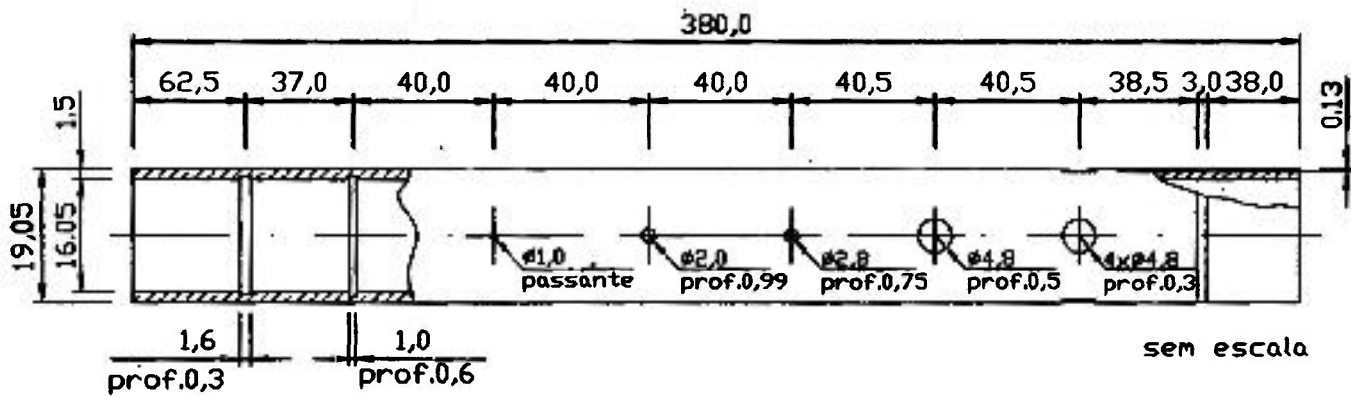


Figura 5.11: Tubos InoxASME 01 e 02

5.2.2.3 Tubo InoxASME03 (Figura 5.12)

O tubo InoxASME03 é um padrão ASME de calibração, com espessura 1,50 mm e produzido por usinagem.

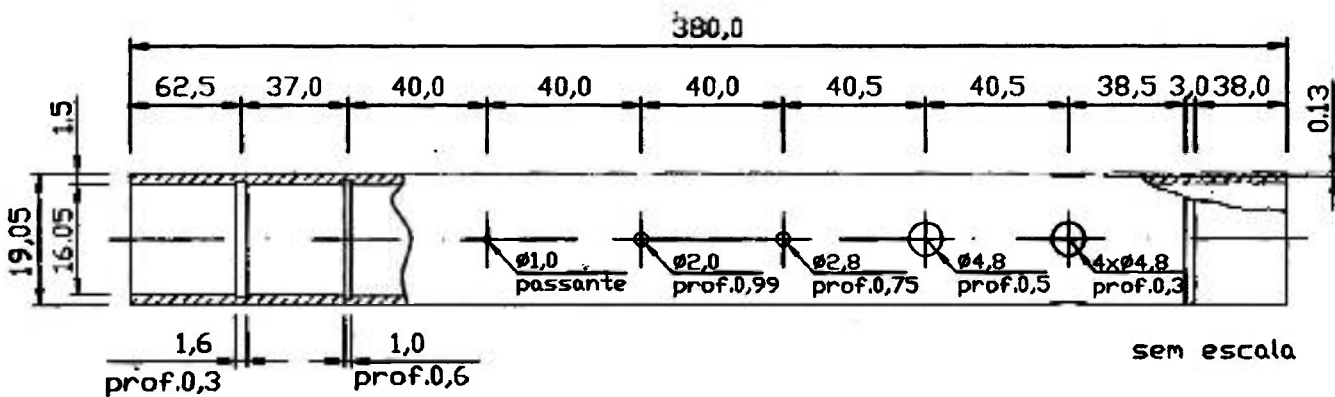


Figura 5.12: Tubo InoxASME 03

5.2.2.4 Tubo InoxDid01 (Figura 5.13)

O tubo InoxDid01 é um tubo de aço inoxidável ASTM A-249-316L, $\varnothing$ 19,05 mm, espessura 1,24 mm (BWG 18), com 4 reduções de 0,4 mm no diâmetro externo do tubo, ou seja $\varnothing$ 18,6 mm, $\varnothing$ 18,2 mm, $\varnothing$ 17,8 mm e $\varnothing$ 17,4 mm com comprimentos de 50 mm cada, 3 furos cegos (não passantes), $\varnothing$ 2,0 mm, com profundidades de 40% (0,496 mm), 60%

(0,744 mm) e 80% (0,992mm) da espessura da parede, 4 furos passantes $\varnothing$ 1,0 mm, $\varnothing$ 2,0 mm, $\varnothing$ 2,8 mm e $\varnothing$ 4,8 mm e 4 furos cegos (não passantes) nos mesmos diâmetros, com profundidades de 50% da espessura da parede (0,62 mm), produzido por usinagem.

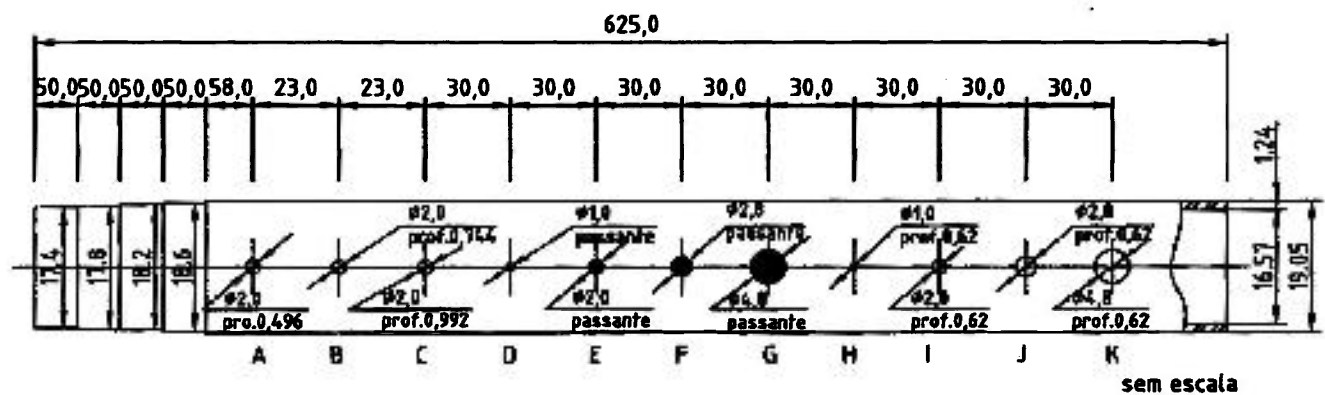


Figura 5.13: Tubo InoxDid01

5.2.2.5 Tubo InoxDid02 (Figura 5.14)

O tubo InoxDid02 é um tubo de aço inoxidável ASTM A-249-316L, $\varnothing$ 19,05 mm espessura 1,24 mm (BWG 18), com 4 defeitos, sendo 2 furos passantes de $\varnothing$ 0,9 mm e $\varnothing$ 1,1 mm e dois riscos, um longitudinal e um transversal com profundidade de 0,1 mm, produzidos por eletroerosão sobre a solda longitudinal.

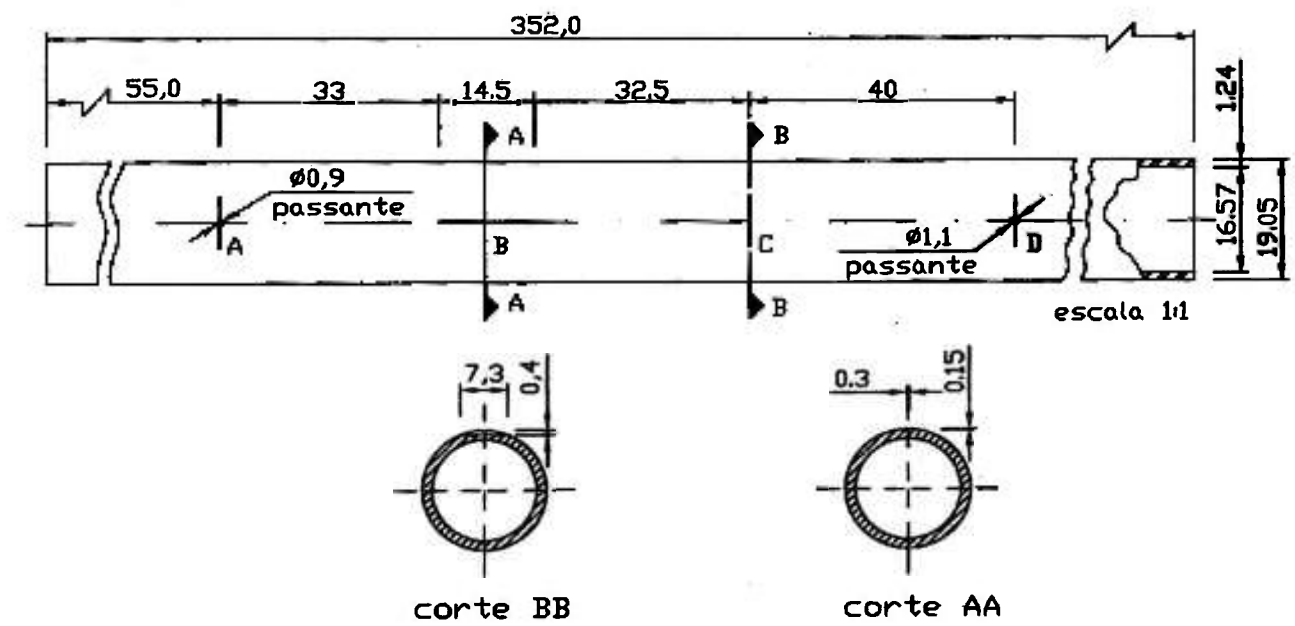


Figura 5.14: Tubo InoxDid02

5.2.2.6 Tubo InoxDid03 (Figura 5.15)

O tubo InoxDid03 é um tubo de aço inoxidável ASTM B-163 600 (Inconel 600), $\varnothing$ 22,22 mm, espessura 1,30 mm (BWG 18), com as mesmas especificações dos tubos utilizados nos feixes tubulares de grande parte dos Geradores de Vapor das usinas nucleares PWR ao redor do mundo, entre as quais, a Usina Nuclear de Angra I.

Esse tubo possui 6 defeitos ASME utilizados para calibração, ou seja, um rasgo interno largura 1,0 mm e profundidade 25% da espessura da parede do tubo, um furo passante $\varnothing$ 1,5 mm, um furo cego externo de fundo plano $\varnothing$ 2,0 mm e profundidade de 75 % da espessura do tubo, um furo cego externo de fundo plano $\varnothing$ 2,8 mm e profundidade de 50 % da espessura do tubo, quatro furos cegos externos de fundo plano $\varnothing$ 3,5 mm e profundidade de 25 % da espessura do tubo e um rasgo externo largura 1,5 mm e profundidade de 50 % da espessura da parede do tubo.

Este tubo também possui mais 9 defeitos produzidos com o objetivo de reproduzir artificialmente os principais defeitos volumétricos encontrados em tubos de Geradores de Vapor de usinas PWR: um furo cego de fundo plano $\varnothing$ 2,0 mm e profundidade de 50 % da espessura do tubo, um furo cônico externo de fundo plano $\varnothing$ 2,0 mm e $\varnothing$ 0,5 mm com profundidade de 75 % da espessura da parede do tubo, um furo cônico externo de fundo plano $\varnothing$ 2,8 mm e $\varnothing$ 0,8 mm com profundidade de 50 % da espessura da parede do tubo, um furo cônico externo de fundo plano $\varnothing$ 3,5 mm e $\varnothing$ 1,0 mm com profundidade de 25 % da espessura da parede do tubo, dois rasgos excêntricos (semi-circunferenciais assimétricos) com 1,5 mm de largura e profundidades de 25 % e 50 % da espessura da parede do tubo e três grandes rasgos semi-circunferenciais simétricos com largura de 10,0 mm e profundidades de 75 %, 50 % e 25 % da espessura da parede do tubo.

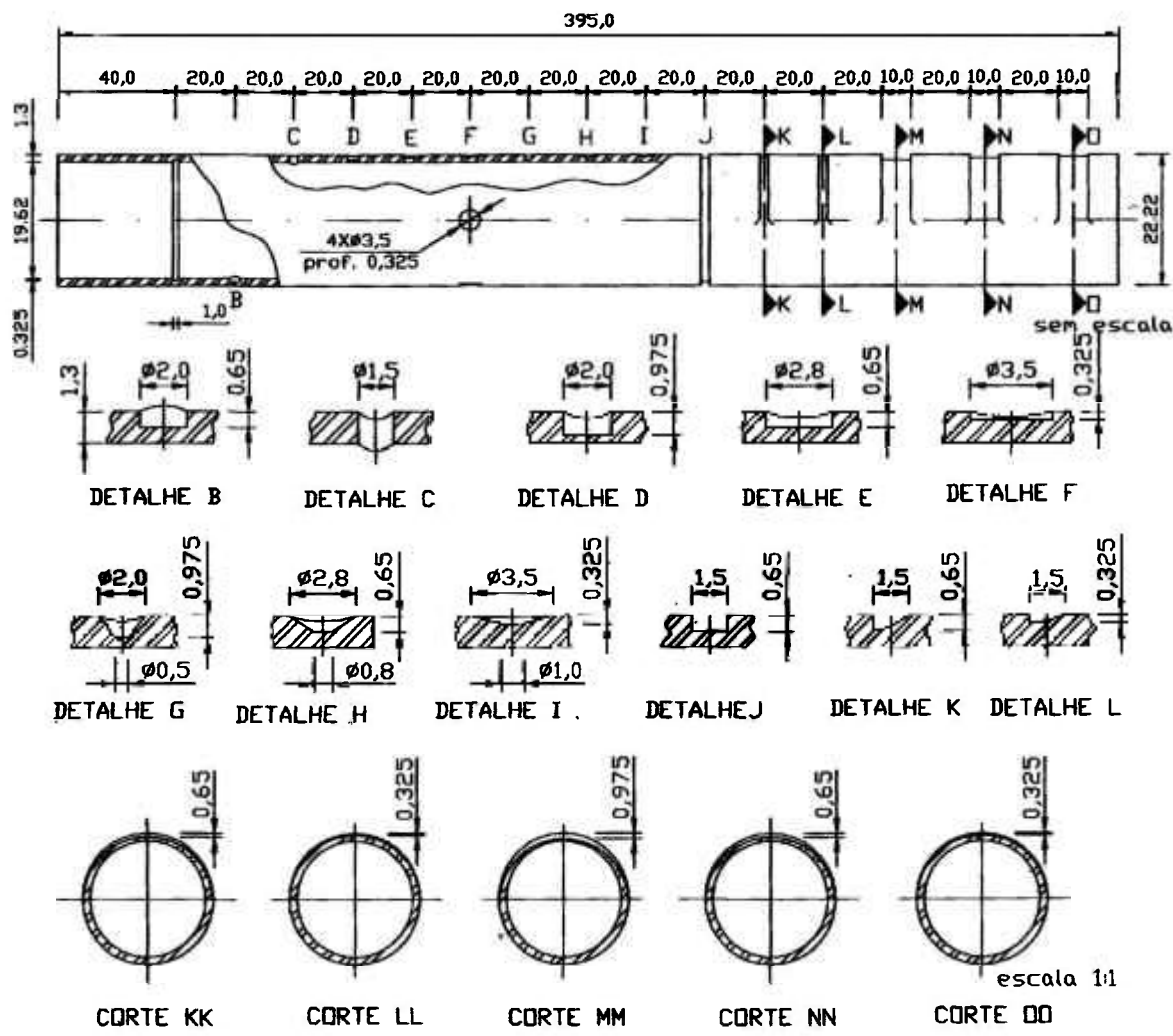


Figura 5.15: Tubo InoxDid03

5.2.2.7 Tubos InoxTroc 01 a 06

Os tubos InoxTroc01 a 06 são tubos de aço inoxidável ASTM A-249-316L, Ø 19,05 mm, espessura 1,65 mm (BWG 16) extraídos de trocadores de calor utilizados em plantas de produção de ácido sulfúrico. Estes tubos apresentam perda de material na superfície externa, especialmente na região das placas suporte do feixe tubular, causada pelo ataque do ácido.

Os comprimentos dos tubos são: InoxTroc01 - 770 mm, InoxTroc02 - 1020 mm; InoxTroc03 - 1330 mm; InoxTroc04 - 980 mm; InoxTroc05 - 730 mm e InoxTroc06 - 1000 mm.

5.3 Arquivos de sinais

A base de dados utilizada neste trabalho é composta por 107 arquivos de sinais obtidos em inspeções realizadas com os aparelhos MIZ-40, Testex Hodking e MIZ-17ET nos tubos apresentados no item anterior.

Cada arquivo é identificado por um código formado pelo código do tubo seguido de uma letra de A a Z. Dessa forma, é possível identificar até 26 arquivos de sinais para um mesmo tubo. A Tabela 5.1 apresenta os dados de aquisição de cada arquivo.

Tabela 5.1: Arquivos de Sinais Adquiridos

Nº	ARQUIVO	APARELHO DE INSPEÇÃO	SONDAS	FREQ. DE INSPEÇÃO (kHz)	FREQ. DE AMOSTRAGEM (Hz)	GANHO (Db)	NÚMERO DE AMOSTRAS	VELOCIDADE OU TEMPO DE INSPEÇÃO
1	LataoASME01A	MIZ-17ET	2 Sondas	16	2.000	46	6.000	~ 3 segundos
2	LataoASME01B	Testex Hodking	Diferenciais 1 Sonda	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos
3	LataoASME02A	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	46	6.000	~ 3 segundos
4	LataoASME02B	Testex Hodking	Diferencial 1 Sonda	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos
5	LataoASME03A	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
6	LataoASME03B	Testex Hodking	Diferencial 1 Sonda	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos
7	LataoASME03C	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	11	1.391	52	5.000	~ 3 segundos
8	LataoASME03D	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	22	1.391	52	5.000	~ 3 segundos
9	LataoASME04A	MIZ-17ET	Diferenciais 1 Sonda	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos
10	LataoASME04B	Testex Hodking	Diferencial 2 Sondas	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos
11	LataoASME04C	MIZ-17ET	Diferenciais 1 Sonda	16	2.000	46	6.000	~ 3 segundos
12	LataoDid01A	Testex Hodking	Diferencial 2 Sondas	16	2.000	46	8.000	~ 4 segundos
13	LataoDid01B	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	34	8.000	~ 4 segundos
14	LataoDid02A	MIZ-17ET	Diferenciais 1 Sonda	16	2.000	58	6.000	~ 3 segundos
15	LataoDid02B	MIZ-17ET	Diferencial 2 Sondas	16	2.000	58	5.000	~ 3 segundos
16	LataoDid02C	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	58	5.000	~ 3 segundos
17	LataoDid02D	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	52	5.000	~ 3 segundos
18	LataoDid02E	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos
19	LataoDid03A	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	34	5.000	~ 3 segundos
20	LataoDid03B	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos
21	LataoDid03C	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos
22	LataoDid03D	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos
23	LataoDid03E	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	58	5.000	~ 3 segundos
24	LataoDid03F	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos
25	LataoDid03G	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos
26	LataoDid04A	MIZ-17ET	Diferenciais 2 Sondas	16	2.000	46	5.000	~ 3 segundos

Tabela 5.1: Arquivos de Sinais Adquiridos (cont.)

Nº	ARQUIVO	APARELHO DE INSPEÇÃO	SONDAS	FREQ. DE INSPEÇÃO (kHz)	FREQ. DE AMOSTRAGEM (Hz)	GANHO (Db)	NÚMERO DE AMOSTRAS	VELOCIDADE OU TEMPO DE INSPEÇÃO
27	LataoDid04B	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	16	2.000	34	5.000	~ 3 segundos
28	LataoDid04C	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	16	2.000	52	5.000	~ 3 segundos
29	LataoDid04D	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	16	2.000	34	5.000	~ 3 segundos
30	LataoDid04E	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	16	2.000	34	5.000	~ 3 segundos
31	LataoDid04F	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	16	2.000	52	5.000	~ 3 segundos
32	LataoDid04G	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	16	2.000	34	5.000	~ 3 segundos
33	InoxASME01A	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	310	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
34	InoxASME01B	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	310	8.000	34	6.000	~ 4 segundos
35	InoxASME01C	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	320	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
36	InoxASME01D	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	320	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
37	InoxASME01E	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	330	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
38	InoxASME01F	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	330	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
39	InoxASME01G	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	340	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
40	InoxASME01H	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	340	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
41	InoxASME01I	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	350	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
42	InoxASME01J	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	350	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
43	InoxASME01K	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
44	InoxASME01L	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
45	InoxASME01M	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	370	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
46	InoxASME01N	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	370	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
47	InoxASME01O	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	380	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
48	InoxASME01P	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	380	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
49	InoxASME01Q	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	390	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
50	InoxASME01R	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	390	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
51	InoxASME01S	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	400	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
52	InoxASME01T	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	400	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
53	InoxASME02A	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	310	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
54	InoxASME02B	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	310	8.000	34	6.000	~ 4 segundos
55	InoxASME02C	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	320	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
56	InoxASME02D	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	320	2.000	34	32.000	~ 3 segundos
57	InoxASME02E	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	330	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
58	InoxASME02F	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	330	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
59	InoxASME02G	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	340	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
60	InoxASME02H	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	340	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
61	InoxASME02I	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	350	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
62	InoxASME02J	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	350	8.000	34	32.000	~ 3 segundos

Tabela 5.1: Arquivos de Sinais Adquiridos (cont.)

Nº	ARQUIVO	APARELHO DE INSPEÇÃO	SONDAS	FREQ. DE INSPEÇÃO (kHz)	FREQ. DE AMOSTRAGEM (Hz)	GANHO (Db)	NÚMERO DE AMOSTRAS	VELOCIDADE OU TEMPO DE INSPEÇÃO
63	InoxASME02K	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
64	InoxASME02L	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
65	InoxASME02M	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	370	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
66	InoxASME02N	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	370	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
67	InoxASME02O	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	380	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
68	InoxASME02P	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	380	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
69	InoxASME02Q	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	390	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
70	InoxASME02R	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	390	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
71	InoxASME02S	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	400	2.000	34	6.000	~ 3 segundos
72	InoxASME02T	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	400	8.000	34	32.000	~ 4 segundos
73	InoxASME03A	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	4.000	34	20.000	~ 5 segundos
74	InoxASME03B	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	4.000	40	20.000	~ 5 segundos
75	InoxASME03C	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	4.000	46	20.000	~ 5 segundos
76	InoxASME03D	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	4.000	52	20.000	~ 5 segundos
77	InoxASME03E	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	4.000	58	20.000	~ 5 segundos
78	InoxDid01A	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	2.000	34	10.000	0,11 m/s
79	InoxDid01B	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	2.000	34	10.000	0,15 m/s
80	InoxDid01C	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	2.000	34	10.000	0,21 m/s
81	InoxDid01D	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	2.000	34	10.000	0,29 m/s
82	InoxDid01E	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	2.000	34	10.000	0,35 m/s
83	InoxDid02A	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	2.000	34	10.000	~5 segundos
84	InoxDid02B	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	2.000	34	6.000	~3 segundos
85	InoxDid02C	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	2.000	34	6.000	~3 segundos
86	InoxDid02D	MIZ-17ET	2 Sondas Diferenciais	360	2.000	34	6.000	~3 segundos
87	InoxDid03A	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	420	8.000	34	32.000	~4 segundos
88	InoxDid03B	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	420	8.000	34	32.000	~4 segundos
89	InoxDid03C	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	200	8.000	34	32.000	~4 segundos
90	InoxDid03D	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	410	8.000	34	40.000	~5 segundos
91	InoxDid03E	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	410	8.000	40	40.000	~5 segundos
92	InoxDid03F	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	410	8.000	46	40.000	~5 segundos
93	InoxDid03G	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	410	8.000	52	40.000	~5 segundos
94	InoxDid03H	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	410	8.000	58	40.000	~5 segundos
95	InoxDid03I	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	380	8.000	58	40.000	~5 segundos
96	InoxDid03J	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	350	8.000	58	40.000	~5 segundos
97	InoxDid03K	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	440	8.000	58	40.000	~5 segundos
98	InoxDid03L	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	440	8.000	34	40.000	~5 segundos

Tabela 5.1: Arquivos de Sinais Adquiridos (cont.)

Nº	ARQUIVO	APARELHO DE INSPEÇÃO	SONDAS	FREQ. DE INSPEÇÃO (kHz)	FREQ. DE AMOSTRAGEM (Hz)	GANHO (Db)	NÚMERO DE AMOSTRAS	VELOCIDADE OU TEMPO DE INSPEÇÃO
99	InoxDid03M	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	460	8.000	34	40.000	~5 segundos
100	InoxDid03N	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	500	8.000	34	40.000	~5 segundos
101	InoxDid03O	MIZ-17ET	1 Sonda Diferencial	410	8.000	46	40.000	~5 segundos
102	InoxTroc01A	Hodking Testex	1 Sonda Diferencial	360	2.000	34	10.000	~5 segundos
103	InoxTroc02A	Hodking Testex	1 Sonda Diferencial	360	2.000	34	10.000	~5 segundos
104	InoxTroc03A	Hodking Testex	1 Sonda Diferencial	360	2.000	34	10.000	~5 segundos
105	InoxTroc04A	Hodking Testex	1 Sonda Diferencial	360	2.000	34	10.000	~5 segundos
106	InoxTroc05A	Hodking Testex	1 Sonda Diferencial	360	2.000	34	10.000	~5 segundos
107	InoxTroc06A	Hodking	1 Sonda Diferencial	360	2.000	34	10.000	~5 segundos

5.4 Leitura e Visualização de Sinais

A leitura e a visualização dos sinais adquiridos é feita pelo Módulo de Leitura e Visualização de Sinais (MLV) que é um programa desenvolvido em MATLAB e cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 5.16.

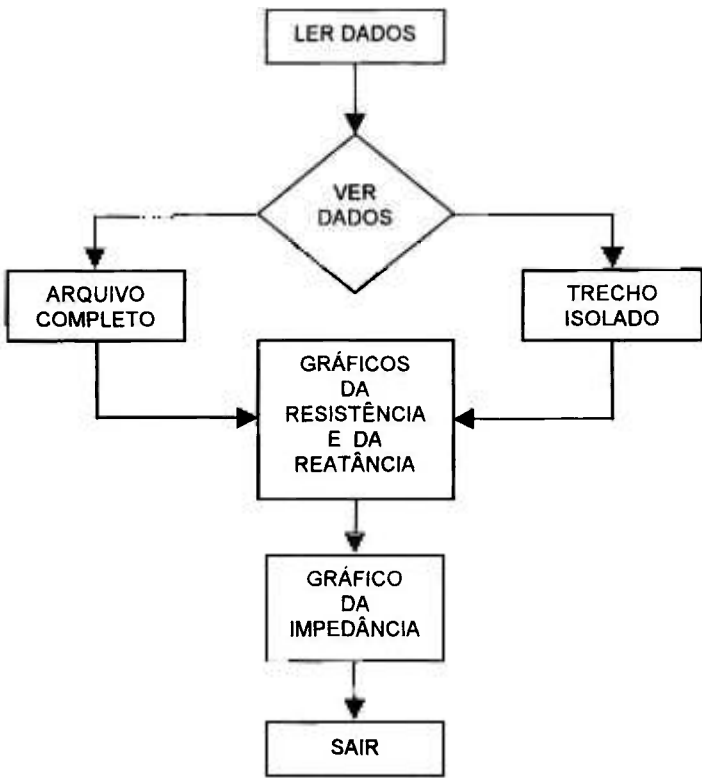


Figura 5.16 Diagrama de Blocos do MLV

O MLV foi concebido para permitir a visualização dos sinais na tela de um PC (Figura 5.17) da mesma forma como são apresentados na tela do aparelho de inspeção (Figura 5.18). Essa visualização valida a aquisição dos sinais. Ao ser ativado, o MLV fornece o menu de opções apresentado na Figura 5.19.

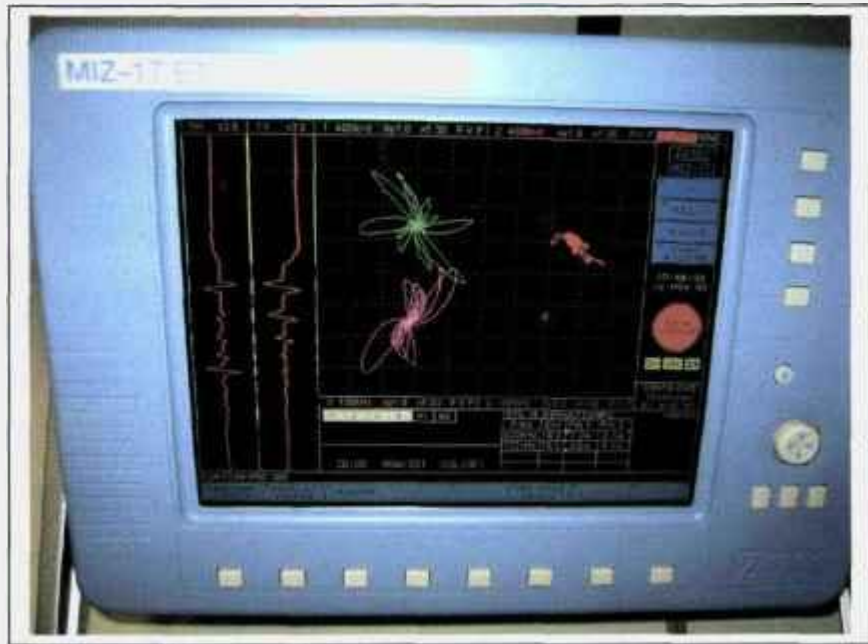


Figura 5.17: Sinais de Eddy-Current na tela do MIZ-17ET



Figura 5.18: Sinais de Eddy-Current na tela do Lap Top

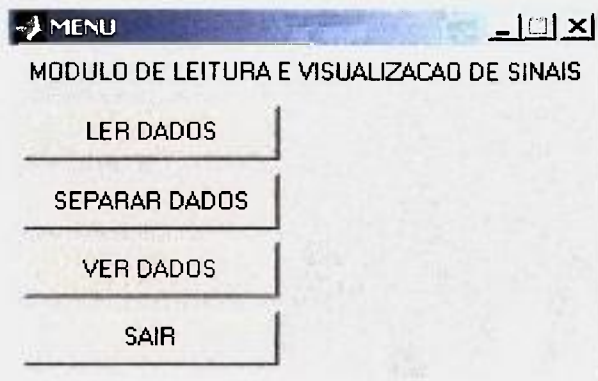


Figura 5.19: Menu de opções do MLV

A opção LER DADOS permite a leitura de um dos arquivos listados na Tabela 5.1. A opção VER DADOS ativa um sub-menu com duas alternativas: ARQUIVO COMPLETO ou TRECHO ISOLADO , conforme apresentado na Figura 5.20.



Figura 5.20: Opções do sub-menu VER DADOS

Caso a opção seja ARQUIVO COMPLETO, o MLV fornece um gráfico com as componentes da Resistência e da Reatância Indutiva dos sinais do arquivo em função das amostras do tubo ou de seu comprimento conforme apresentado no Figura 5.21. A Impedância de todos os sinais do arquivo (figuras de Lissajous) é apresentada em outro gráfico, conforme ilustra a Figura 5.22.

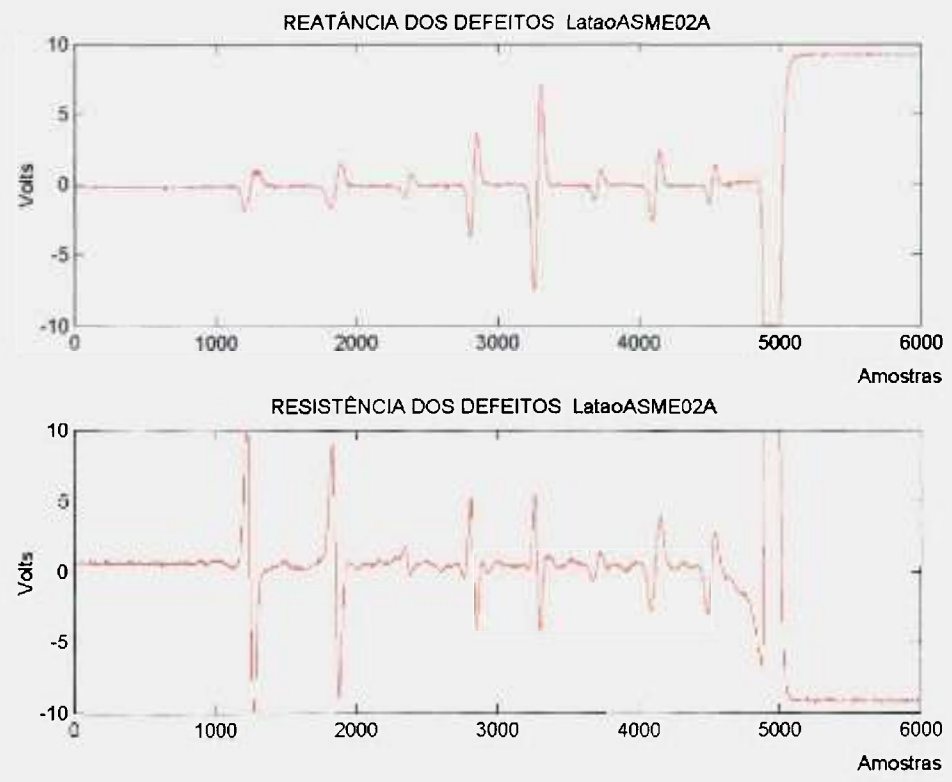


Figura 5.21: Reatância e Resistência de todos os sinais do arquivo LataoASME02A

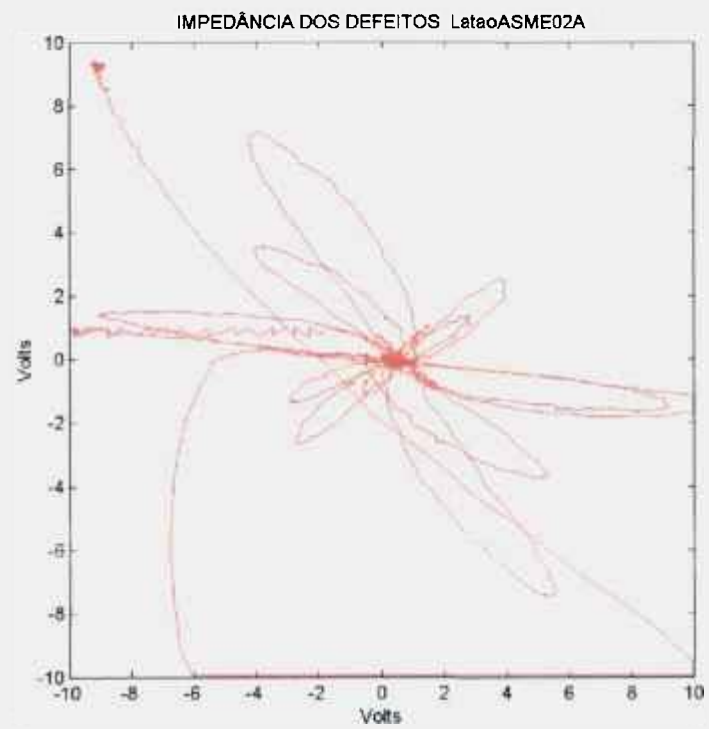


Figura 5.22: Impedância do ARQUIVO COMPLETO LataoASME02A

Caso a opção seja TRECHO ISOLADO, o MLV solicita a seleção da amostra inicial e da amostra final de interesse, conforme apresentado na Figura 5.23.

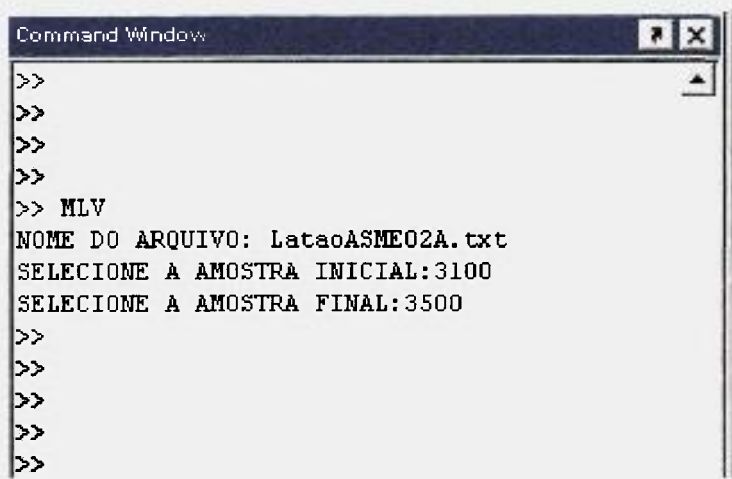


Figura 5.23: Seleção das amostras inicial e final para um TRECHO ISOLADO do arquivo LataoASME02A

A seguir o MLV fornece as componentes da Resistência e da Reatância Indutiva bem como da Impedância do trecho selecionado conforme apresentado na Figura 5.24 e na Figura 5.25.

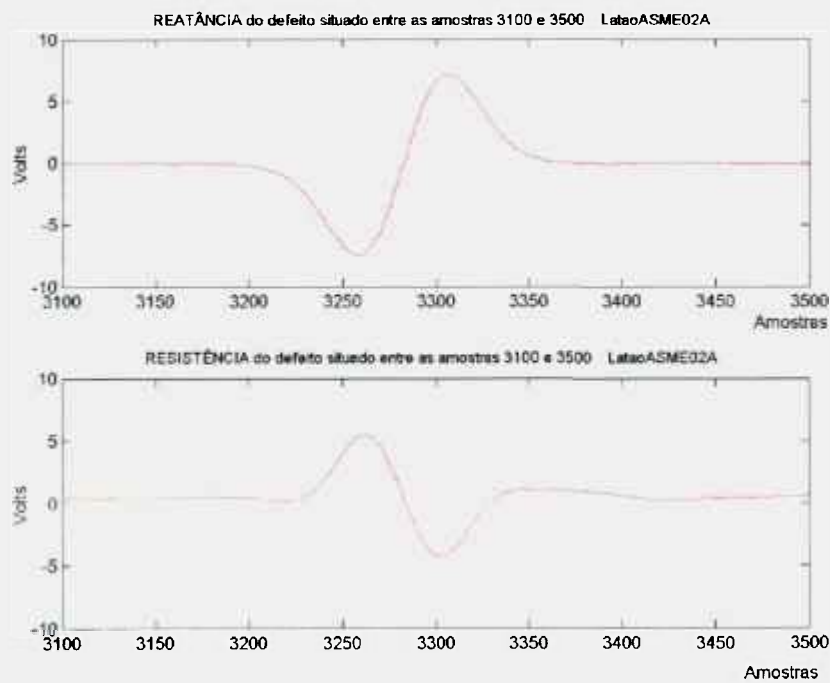


Figura 5.24: Reatância e Resistência de um TRECHO ISOLADO de sinais do arquivo LataoASME02A

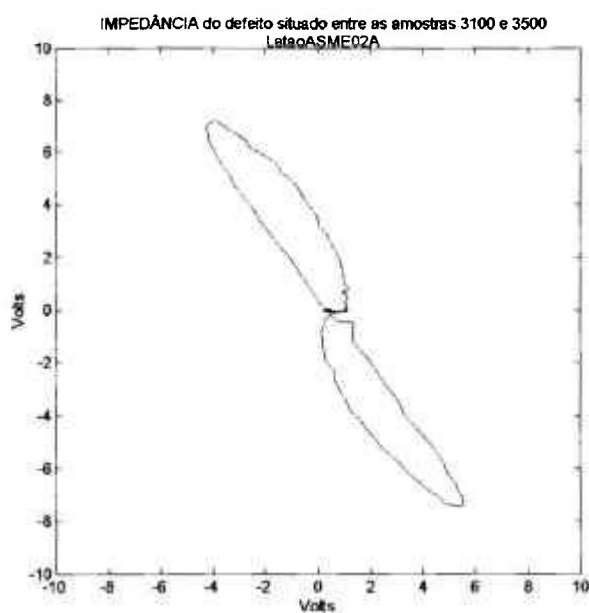


Figura 5.25: Impedância de um TRECHO ISOLADO de sinais do arquivo LataoASME02A

Para selecionar um outro intervalo de amostras basta optar novamente por TRECHO ISOLADO e inserir o novo intervalo. Para encerrar o MLV e retornar ao menu principal do MATLAB é necessário acionar a opção SAIR.

6. PRÉ-PROCESSAMENTO DE SINAIS DE EDDY-CURRENT

Os sinais gerados nas inspeções por Eddy-Current contêm ruídos que impedem o seu processamento para a extração de características que permitam a detecção, a localização, a classificação e o dimensionamento de defeitos.

O pré-processamento de sinais tem como objetivo a remoção do ruído para permitir a análise das figuras de Lissajous, o que não é possível quando os sinais estão na sua forma original com ruído.

O pré-processamento consiste em decompor separadamente, em diversos níveis de frequência, a reatância indutiva e a resistência dos sinais e utilizar Transformadas de Wavelets (TW) para retirar as componentes associadas ao ruído. Em seguida, o sinal é recomposto gerando figuras de Lissajous apropriadas para a extração de características do sinal.

Existem diversas transformadas que podem ser utilizadas para a análise de sinais. As principais serão descritas a seguir, justificando a utilização da Transformada de Wavelet (Ondaleta) no pré-processamento de sinais de Eddy-Current.

6.1 Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier (TF) é uma das mais tradicionais e conhecidas técnicas matemáticas de análise de sinais e consiste na decomposição de um sinal nas suas senóides constituintes em diferentes frequências (Silva, 1997), conforme apresentado na Figura 6.1. Em outras palavras, a análise de Fourier transforma matematicamente a apresentação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, ou seja,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (6.1)$$

onde $f(t)$ é o sinal e $e^{-j\omega t}$ é um exponencial complexo.

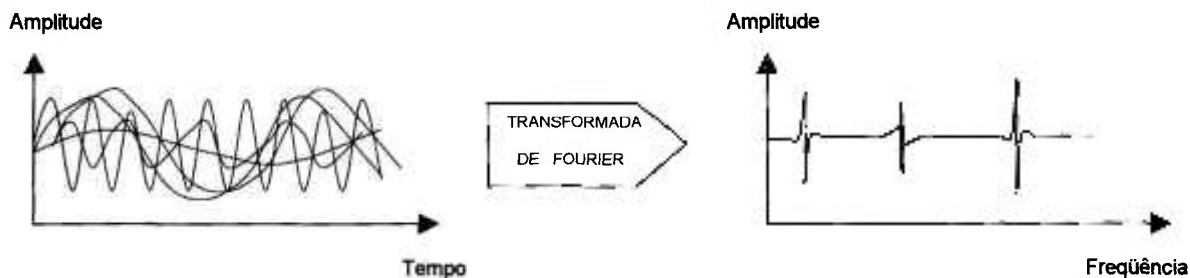


Figura 6.1: Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier é apropriada para medir propriedades de regularidade de sinais estacionários, ou seja, sinais cujas propriedades não mudam muito ao longo do tempo. Sinais desse tipo são bem representados e esta técnica é extremamente útil quando o conteúdo em frequência do sinal é de grande importância (Morettin, 1996).

Apesar deste método ser capaz de isolar uma frequência de pico, resultando em um sinal puro, alguns problemas podem ser encontrados quando um sinal contém duas frequências em intervalos muito próximos, característica típica dos sinais de Eddy-Current. Nesse caso são gerados dois picos, porém sem qualquer informação sobre a localização no tempo. Dessa forma, um sinal estacionário é bem representado porém a informação no tempo de sinais não estacionários não é recuperada.

Uma característica peculiar apresentada pela Transformada de Fourier é a perda da informação no tempo quando é feita a transformação para o domínio da frequência. A falta de localização do sinal no tempo permite apenas uma análise do comportamento global dos sinais. Para sinais estacionários esta característica não é muito importante. No entanto, quando o sinal contém características não estacionárias ou transitórias, tais como tendências, mudanças abruptas, inícios e fins de eventos, tais como os sinais de Eddy-Current, a Transformada de Fourier apresenta uma séria desvantagem pois não recupera a informação relacionada com o tempo, perdendo a parte do sinal que permite a localização de um defeito no comprimento do tubo.

6.2 Transformada de Fourier de Tempo Curto

A representação da frequência no tempo, conhecida como Transformada de Fourier de Tempo Curto ou Rápida (TFTC), soluciona os problemas da análise de sinais não estacionários porém apresenta o inconveniente de considerar apenas frequências fixas.

Esta transformada foi concebida na década de 40 por Dennis Gabor com o objetivo de corrigir a deficiência da Transformada de Fourier quando aplicada a sinais não estacionários (Steinberg *et al.*, 1993).

A TFTC é uma adaptação da Transformada de Fourier na medida em que cria uma janela no tempo de dimensão fixa e analisa apenas uma pequena seção do sinal fazendo um mapeamento do sinal no tempo e na frequência. Uma vez escolhida a dimensão da janela no tempo, esta janela será a mesma para todas as frequências.

Na TFTC o sinal pode ser considerado aproximadamente estacionário. Esta análise depende da dimensão da janela fixa escolhida que, por sua vez, determina a precisão das informações de tempo-frequência do sinal. A Figura 6.2 apresenta graficamente o processo de análise por TFTC.

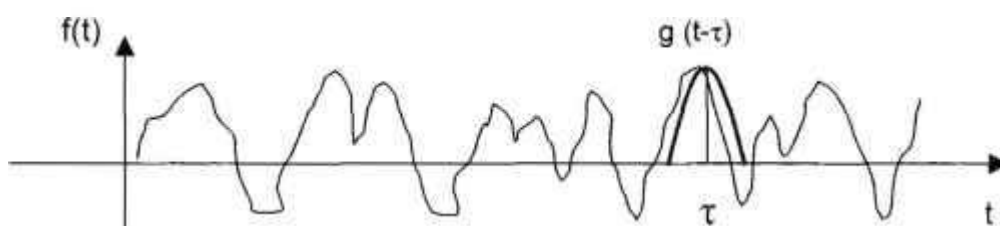


Figura 6.2: Janela no tempo da TFTC

Para definir a TFTC, considera-se que o sinal $f(t)$ é estacionário quando colocado em uma janela de dimensão fixa $g(t-\tau)$, centrada no tempo τ . A Transformada de Fourier dos sinais colocados na janela selecionada levam à TFTC definida como:

$$\text{TFTC}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g(t-\tau) e^{-2\pi i f t} dt \quad (6.2)$$

A equação da TFTC mapeia o sinal em uma função bi-dimensional no plano tempo-frequência (t, f) . A análise depende da janela $g(t-\tau)$ escolhida e, uma vez escolhida essa janela, a resolução da TFTC é fixada sobre todo o plano tempo-frequência.

A TFTC representa um compromisso entre as projeções baseadas em tempo-frequência de um sinal e proporciona alguma informação sobre ambas. Entretanto, esta

informação só pode ser obtida com precisão limitada. A precisão é determinada pelas dimensões da janela que fixa as resoluções de tempo e frequência.

A Transformada de Fourier de Tempo Curto é limitada pelo princípio da incerteza segundo o qual não é possível atingir uma resolução fina em tempo e frequência simultaneamente. Se a resolução no tempo é melhorada pelo uso de uma janela apropriada, a resolução na frequência é prejudicada. Esse compromisso entre tempo e frequência é dado pela inequação de Heisenberg, que relaciona o produto da largura da banda em frequência Δf pelo tempo Δt :

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq 1/4 \pi \quad (6.3)$$

Uma vez escolhida a janela $g(t-\tau)$ para a TFTC, a resolução da frequência no tempo é fixada sobre todo o plano tempo-frequência. Normalmente, a TFTC é representada por uma plotagem chamada de espectrograma que descreve a distribuição da energia do sinal no domínio tempo x frequência, conforme apresentado na Figura 6.3.

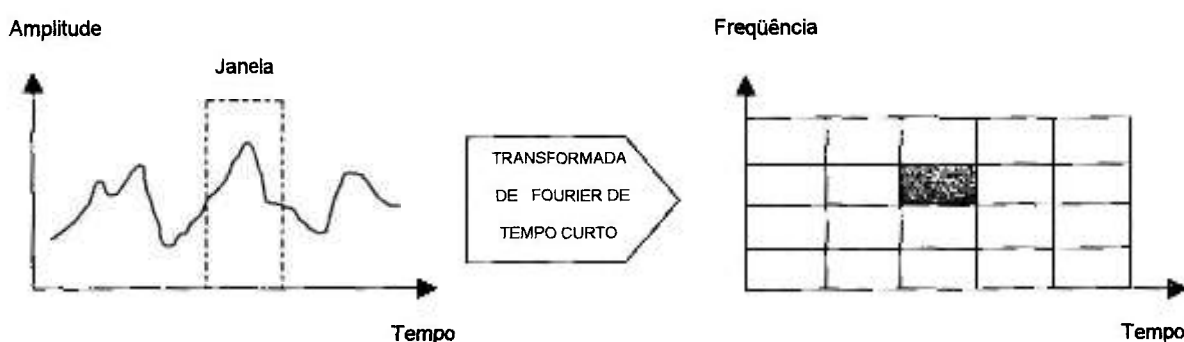


Figura 6.3: Transformada de Fourier de Tempo Curto

Os sinais de Eddy-Current requerem uma abordagem mais flexível onde se possa variar a dimensão da janela com o objetivo de determinar mais precisamente o tempo ou a frequência.

6.3 Transformada de Wavelet

A Transformada de Wavelet ou Ondaleta (TW), foi proposta por Mallat (1989). Esse conceito de expansão é um tipo de análise de sinais que combina o uso de janelas no

tempo com regiões de dimensões variáveis, permitindo o uso de grandes intervalos de tempo onde são necessárias informações mais precisas de baixa frequência e regiões menores no tempo onde são necessárias informações de alta frequência. A TW permite a análise de um trecho de um sinal. Dessa forma, a TW sobrepuja as limitações de resolução das técnicas de Transformadas de Fourier e TFTC.

A Transformada de Wavelet possui sensibilidade a descontinuidades temporais que é uma característica típica dos sinais de Eddy-Current. A TW é uma ferramenta poderosa que tem sido aplicada na última década em diversos problemas de análise de sinais nas mais variadas áreas tais como vibrações de máquinas, processamento de som e imagem, análise sísmica, música, sinais biomédicos, etc. (Steinberg et al. 1993).

A Transformada de Wavelet é um método onde a resolução tempo-frequência da transformada varia, ou seja, a resolução no domínio tempo-frequência não é uniforme, permitindo uma descrição mais precisa do comportamento do sinal. Em outras palavras, a TW fornece a localização da frequência proporcionalmente ao seu nível e, conseqüentemente, a localização no tempo se torna mais precisa para altas frequências. Essa transformada é uma ferramenta que separa os dados em componentes diferenciados na frequência e então estuda cada componente com uma resolução semelhante à sua escala.

Nessa transformada, um conjunto de sub-espacos $\{V_j\}_{j \in Z}$ é uma aproximação de multiresolução de $L^2(R)$ se possuir uma série de propriedades peculiares, onde Z é um conjunto de integrais.

As propriedades peculiares estabelecem que $\{V_j\}_{j \in Z}$ é associado a uma seqüência de sub-espacos que efetivamente cobre $L^2(R)$, ou seja, qualquer função integrável ao quadrado pode ser aproximada tanto quanto se queira por uma função que pertença a pelo menos um dos sub-espacos V_j . Portanto, as funções que representam a Transformada de Wavelet, integráveis ao quadrado na linha real $f(x) \in L^2$ significam:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx < \infty \quad (6.4)$$

Os conjuntos de funções que são gerados na análise de Wavelet são obtidos por meio da expansão e translação (mudança no tempo) de uma função protótipo simples $\psi(x)$, que é chamada de função Wavelet básica. Esta função é oscilatória no tempo e é

normalmente centrada na origem terminando rapidamente quando $|x| \rightarrow \infty$. A função Wavelet é uma onda com um comprimento total que é delimitado pela escala, isto é, conforme a escala em que se trabalha, a função Wavelet fica mais comprimida ou mais expandida.

A função Wavelet básica $\psi(x) \in L^2(R)$ tem dois parâmetros característicos, chamados escala a e posição b , que variam continuamente.

Um conjunto completo de funções Wavelets básicas $\psi_{a,b}(x)$ pode ser gerado pela translação e dilatação da função Wavelet básica $\psi(x)$ como:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \tag{6.5}$$

onde a e $b \in R$ e $a \neq 0$

Portanto, a função Wavelet varia de escala e é deslocada ao longo do sinal analisado gerando coeficientes a e b que podem ser plotados em um gráfico no domínio tempo-escala como apresentado na Figura 6.4, onde as regiões claras representam valores altos dos coeficientes.

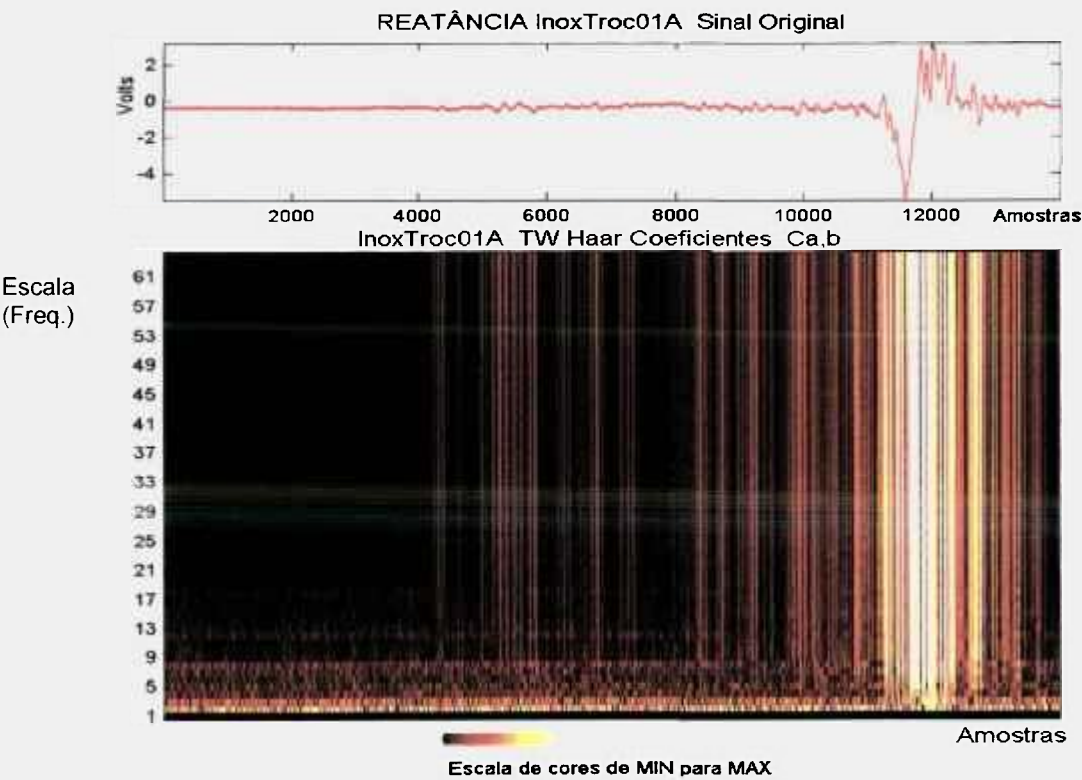


Figura 6.4: Coeficientes da reatância dos sinais dos defeitos do tubo InoxTroc01

Dado um sinal de Eddy-Current $s(x)$, a TW consiste na projeção de $s(x)$ em um conjunto de funções de análise $\psi_{a,b}(x)$ de acordo com:

$$TW_{s(a,b)} = \int_{-\infty}^{+\infty} s(x) \psi_{a,b}(x) dx \quad (6.6)$$

O resultado da TW são muitos coeficientes C que são funções de escala e posição:

$$C_{(escala,posição)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{(escala,posição,t)} dt \quad (6.7)$$

Se multiplicarmos cada coeficiente pela Wavelet apropriadamente dilatada e translacionada, obteremos as Wavelets que constituem o sinal original.

Existe uma relação entre a escala da Wavelet e a frequência, ou seja, uma escala pequena resulta em uma Wavelet comprimida onde os detalhes mudam rapidamente em alta frequência (ω), enquanto que uma escala grande resulta em uma Wavelet expandida onde os detalhes mudam lentamente em baixa frequência (ω).

Na Análise por Wavelets utiliza-se a decomposição em múltiplos níveis onde cada sinal é primeiramente decomposto em uma aproximação e um detalhe conforme a árvore de decomposição apresentada na Figura 6.5.

A aproximação é a componente de alta escala e baixa frequência do sinal. O detalhe é a componente de baixa escala e alta frequência do sinal.

A aproximação é decomposta em uma aproximação e um detalhe e assim sucessivamente. Para uma decomposição em n níveis, existem $n+1$ possibilidades de decompor um sinal onde:

$$S = A_3 + D_3 + D_2 + D_1 = A_2 + D_2 + D_1 = A_1 + D_1$$

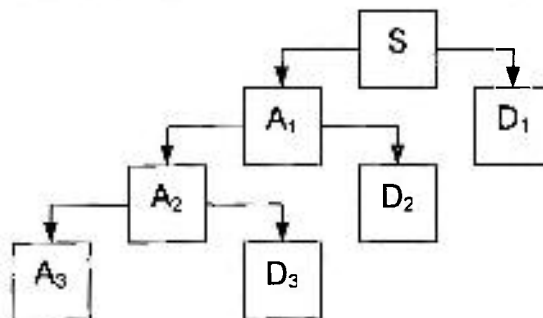


Figura 6.5: Árvore de decomposição da Análise por Wavelets
(Matlab)

Na Análise por Pacotes de Wavelets, tanto as aproximações quanto os detalhes podem ser decompostos, o que resulta em 2^{n-1} possibilidades de decompor um sinal conforme apresentado na Figura 6.6, onde uma das possibilidades de decomposição é

$$S=A_1+AD_2+ADD_3+DDD_3$$

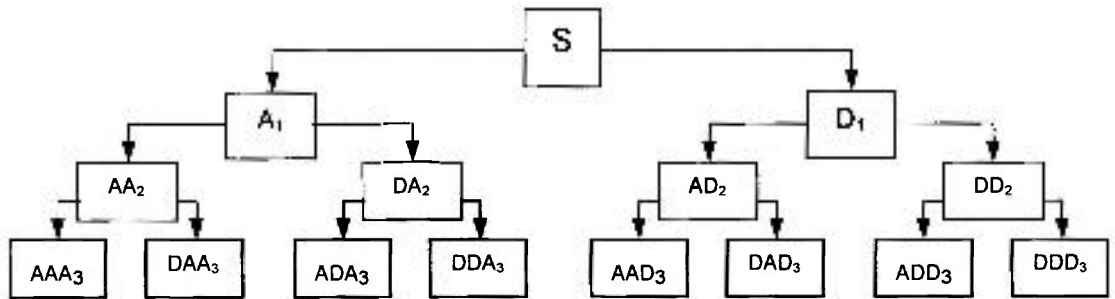


Figura 6.6: Árvore de decomposição da Análise por Pacotes de Wavelets (Matlab)

Neste trabalho optou-se por utilizar a Análise por Wavelets por ser um método menos trabalhoso pois a seleção dos coeficientes é feita manualmente, mas propõe-se para um trabalho futuro, a utilização da Análise por Pacotes de Wavelets para os sinais de Eddy-Current.

O trabalho de análise do sinal se torna mais eficiente e preciso através da utilização da Transformada de Wavelet Discreta (TWD), que utiliza escalas e posições diádicas, ou seja, baseadas em potências de dois.

Após a decomposição em múltiplos níveis para análise, o sinal é recomposto ou sintetizado por meio da TWD utilizando os coeficientes a e b .

Neste trabalho, o pré-processamento de sinais por meio da Transformada de Wavelet é feita pela ferramenta Wavelet do programa MATLAB que permite aplicar a Transformada de Wavelet das mais variadas formas.

Existem diversas famílias de Wavelets (Haar, Daubechies, Biortogonal, Morlet, etc.) e a seguir serão descritas as principais.

6.3.1 Função Wavelet Haar

A função Wavelet Haar é a mais simples que existe, é apresentada na Figura 6.7 e assume os valores:

$$\begin{aligned}
 \psi(x) &= 1, \text{ se } x \in [0, 0.5] \\
 \psi(x) &= -1, \text{ se } x \in [0.5, 1] \\
 \psi(x) &= 0, \text{ se } x \notin [0, 1] \\
 \phi(x) &= 0, \text{ se } x \in [0, 1] \\
 \phi(x) &= 0, \text{ se } x \notin [0, 1]
 \end{aligned}$$

onde $\psi(x)$ é uma função Wavelet de escala utilizada para definir as aproximações, sendo

$$\int \psi(x) dx = 0 \quad (6.8)$$

e $\phi(x)$ é uma Wavelet utilizada para definir os detalhes, sendo

$$\int \phi(x) dx = 1 \quad (6.9)$$



Figura 6.7: Função Wavelet Haar

6.3.2 Função Wavelet Daubechies

A função Wavelet Daubechies DbN possui uma família composta por 9 membros Db2 a Db10 (Daubechies, 1988) que é apresentada na Figura 6.8. A função Wavelet Db1 corresponde à função Wavelet Haar.

Não há uma expressão explícita para DbN quando $N \neq 1$. Entretanto, o módulo ao quadrado da função de transferência de h gera uma função explícita e relativamente simples, onde h_k ($k \in \mathbb{Z}$) é um filtro de escala associado à Wavelet. Considerando uma função $P(y)$

$$P(y) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k^{N-1-k} y^k \quad (6.10)$$

onde N C_k^{N-1-k} são os coeficientes binomiais, então

$$|m_o(\omega)|^2 = \left[\cos^2\left(\frac{\omega}{2}\right) \right]^N P \left[\sin^2\left(\frac{\omega}{2}\right) \right] \quad (6.11)$$

onde,

$$m_a(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k e^{-ik\omega} \quad (6.12)$$

A maioria das Wavelets Daubechies são assimétricas. Em algumas delas, a assimetria é muito pronunciada.

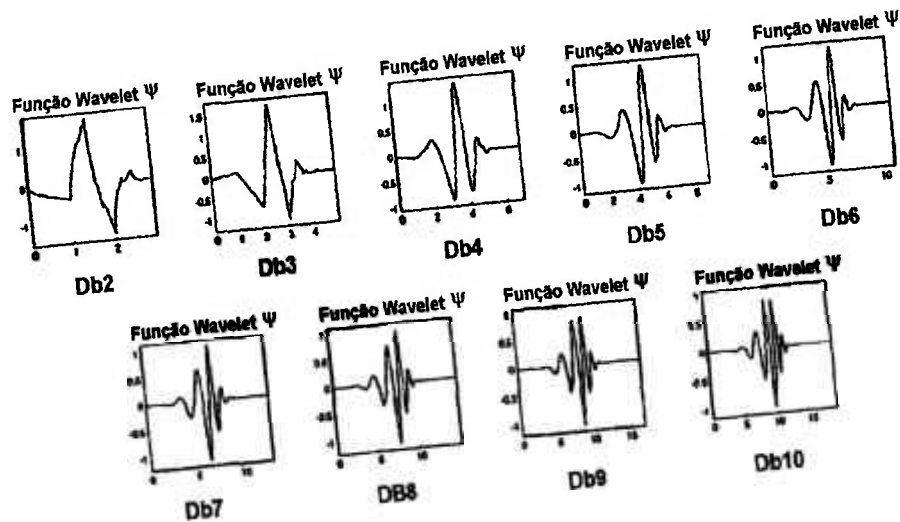


Figura 6.8: Família da função Wavelet Daubechies (Matlab)

6.3.3 Função Wavelet Morlet

Esta função Wavelet, apresentada na Figura 6.9 é explícita e definida por:

$$\psi(x) = C e^{-x^2/2} \cos(5x) \quad (6.13)$$

onde a constante C é utilizada para normalização da reconstrução.

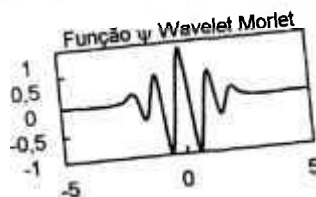


Figura 6.9: Função Wavelet Morlet

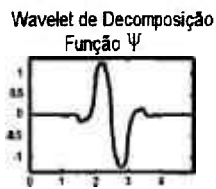
6.3.4 Função Wavelet Biortogonal

A família de funções Wavelet Biortogonal BiorNr.Nd é simétrica. São utilizadas duas Wavelets sendo uma para decomposição e outra para reconstrução do sinal pois a simetria e a reconstrução exata não são compatíveis nesta transformada. A Wavelet utilizada para decomposição é $\tilde{\psi}$ e os coeficientes de um sinal s são:

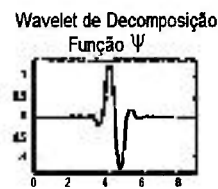
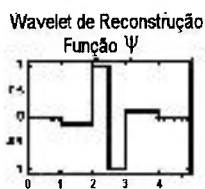
$$\tilde{c}_{j,k} = \int s(x) \tilde{\psi}_{j,k}(x) dx \quad (6.14)$$

A Wavelet utilizada para a reconstrução do sinal é ψ , tal que

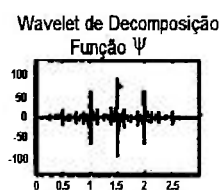
$$s = \sum_{j,k} \tilde{c}_{j,k} \psi_{j,k} \quad (6.15)$$



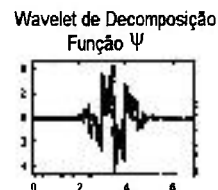
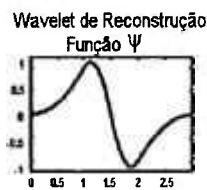
Bior 1.3



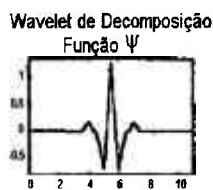
Bior 1.5



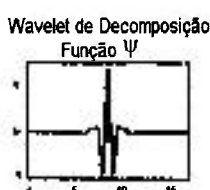
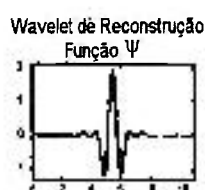
Bior 3.1



Bior 3.3



Bior 5.5



Bior 6.8

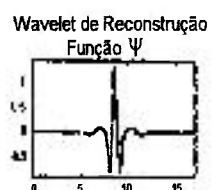


Figura 6.10: Função Wavelet Biortogonal
(Matlab)

6.3.5 Função Wavelet Chapéu Mexicano

A função Wavelet Chapéu Mexicano, apresentada na Figura 6.11 é definida por:

$$\psi(x) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} \right) (1 - x^2) e^{-x^2/2} \quad (6.16)$$

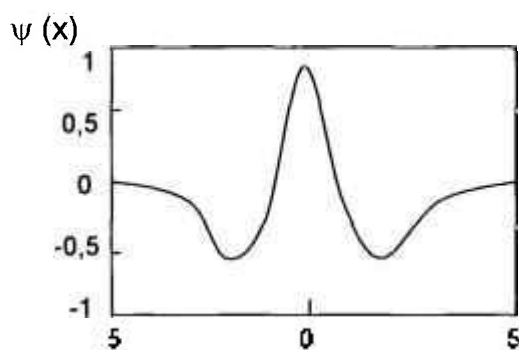


Figura 6.11: Função Wavelet Chapéu Mexicano

6.4 Remoção do ruído por meio de Transformadas de Wavelet

O ruído é um dos maiores problemas encontrados em dados de campo obtidos em inspeções de Geradores de Vapor. Os dados fornecidos pelas inspeções por Eddy-sinais adquiridos, tornando complexo o problema da validação de sinais (Upadhyaya et al., 1997).

O ruído pode ser consequência de interferência elétrica, mudanças no ambiente posicionamento do sensor, ou informações reais porém não desejadas, tais com aquelas resultantes de depósitos químicos localizados ao longo do tubo inspecionado ou no defeito.

O ruído dos sinais de Eddy-Current será removido através da transformação dos dados para os domínios da frequência e da amplitude utilizando Transformadas de Wavelet. Essas transformadas separam os sinais em diversas bandas de frequência e amplitude.

Os sinais de Eddy-Current contêm três tipos de ruídos: o Ruído de Aquisição do Sinal (RAS), o Ruído do Material (RMT) e o efeito “Lift-off”. A seguir é apresentada a metodologia aplicada neste trabalho no pré-processamento de sinais de Eddy-Current com o objetivo de retirar os ruídos.

O pré-processamento é necessário para gerar figuras de Lissajous apropriadas características do sinal que permitam o dimensionamento do defeito.

6.4.1 Remoção do Ruído de Aquisição do Sinal

O RAS é um ruído de alta frequência e baixa amplitude, geralmente causado por um ganho elevado do sinal que chega a impedir a definição da figura de Lissajous do defeito.

Para a remoção deste ruído, o sinal da impedância é primeiramente separado em resistência e reatância indutiva.

A seguir, a resistência e a reatância indutiva são decompostas separadamente com TW em diversos níveis de frequência. Procede-se então manualmente à retirada das frequências mais altas, alterando os coeficientes das TW, com o cuidado de não alterar as componentes de baixa frequência e grande amplitude do sinal, ou seja, o sinal DC.

Finalmente, a resistência e a reatância pré-processadas são combinadas resultando, no plano da impedância, uma figura de Lissajous reconstruída e apropriada à extração de características do sinal.

Todas as etapas deste processo são ilustradas nas figuras que se seguem.

A Figura 6.12 (esquerda) apresenta a impedância do sinal original do defeito C do tubo LataoDid02, que é um furo cego externo $\varnothing 2,0$ mm com profundidade de 30% da espessura da parede do tubo. Esse sinal foi adquirido com um ganho elevado de 58 dB pelo aparelho MIZ-17ET.

A Figura 6.12 (direita) apresenta a resistência e a reatância indutiva separadas desse mesmo sinal.

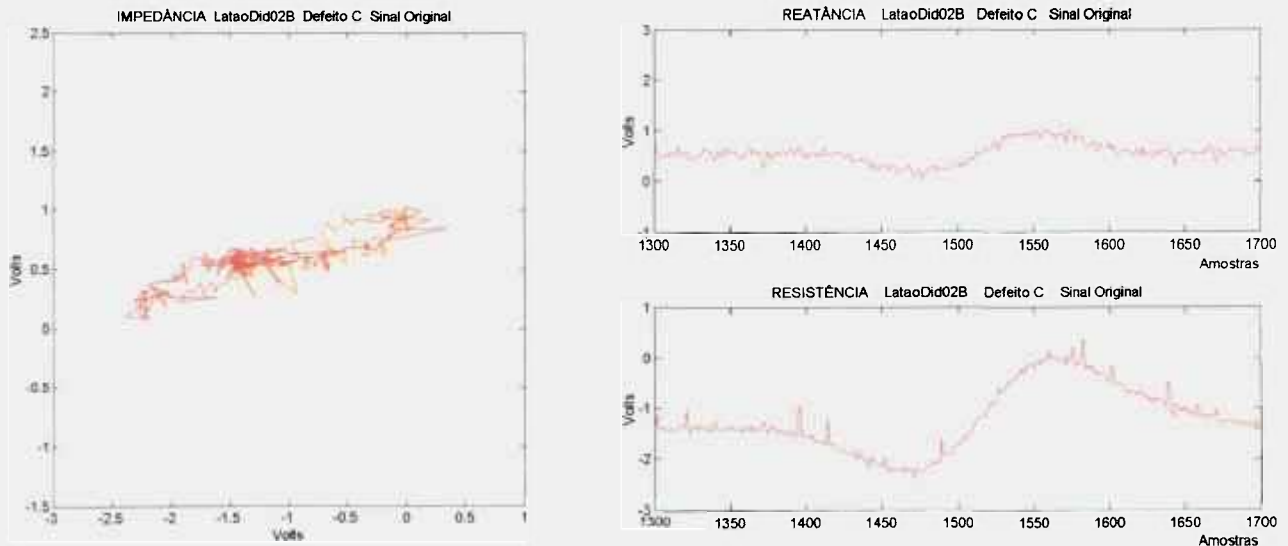


Figura 6.12: Sinal original do defeito C do tubo LataoDid02

A Figura 6.13 apresenta a resistência e a reatância indutiva decompostas separadamente com a TW Daubechies 10 em 8 níveis de frequência.

A Figura 6.14 apresenta o processo de remoção manual das frequências altas e médias.

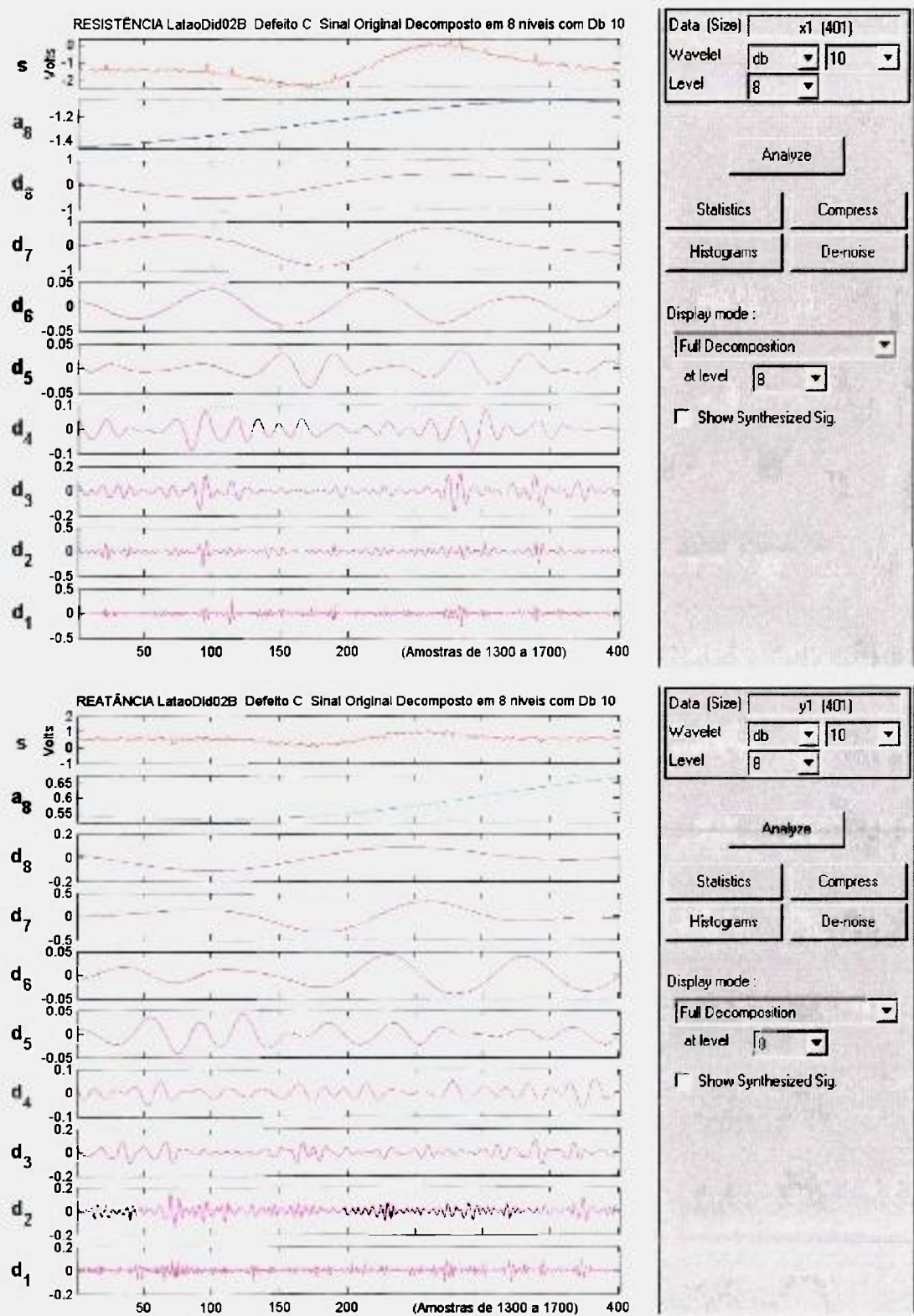


Figura 6.13: Resistência e reatância do sinal do defeito C do tubo LataoDid02 decompostas com a TW Daubechies 10

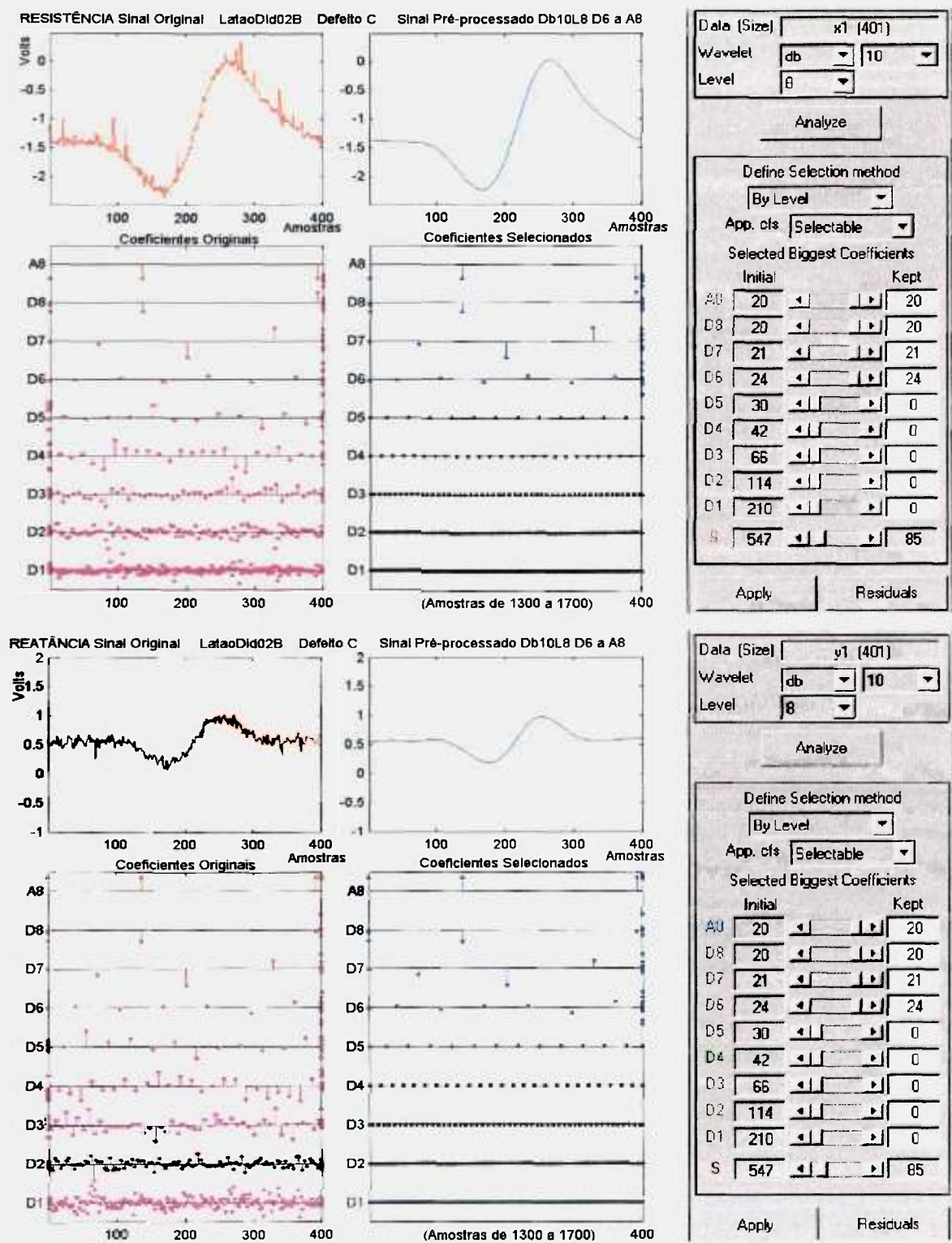


Figura 6.14: Remoção das frequências altas e médias do sinal do defeito C do tubo LataoDid02

A Figura 6.15 apresenta o resultado final do pré-processamento para a retirada do RAS com as comparações das figuras de Lissajous do sinal com ruído e sem ruído, onde se constata os bons resultados da reconstrução da figura sem as frequências altas e médias (D1 a D5).

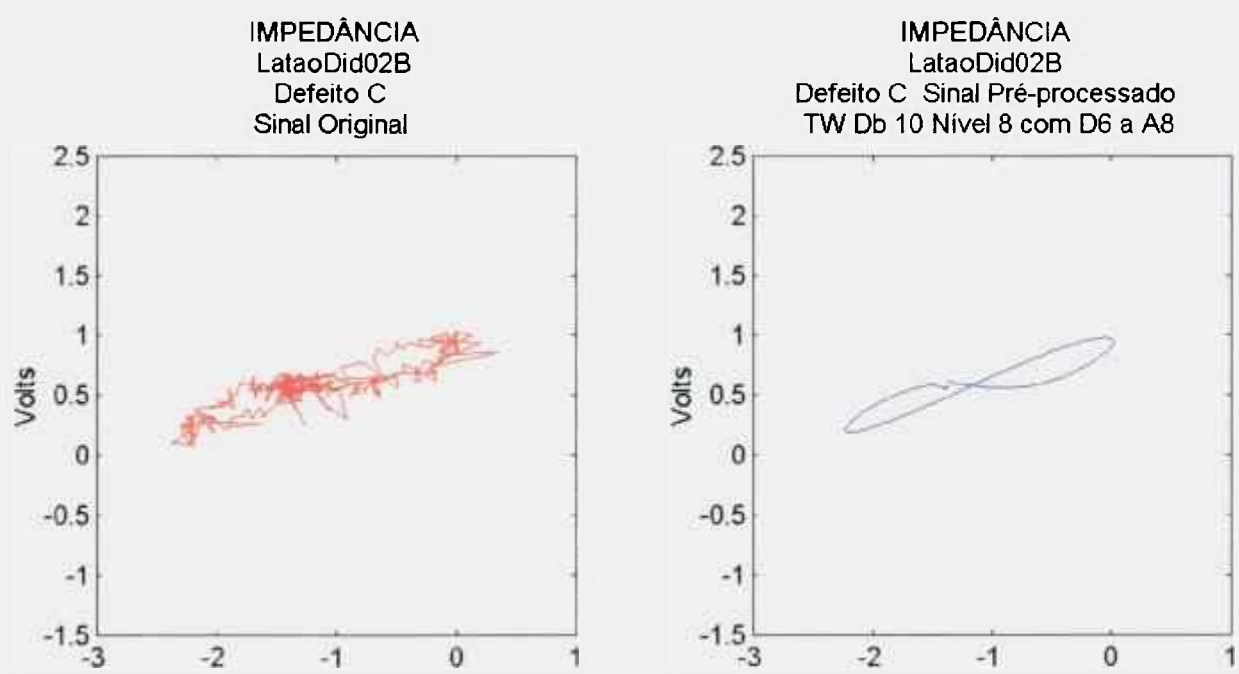


Figura 6.15: Remoção do RAS do sinal do defeito C do tubo LataoDid02

A seguir são apresentados outros exemplos de remoção do RAS por meio da aplicação das Transformadas de Wavelets Biortogonal, Symlets e Daubechies aos sinais dos tubos LataoASME01, LataoDid04 e InoxDid03 (Inconel 600).

6.4.1.1 Remoção do RAS do Defeito B do tubo LataoASME01

A Figura 6.16 apresenta a remoção do RAS do sinal do defeito B do tubo LataoASME01, onde a Transformada de Wavelet Biortogonal 3.1 decompondo o sinal em 7 níveis de frequência, com a remoção das frequências altas e altas-médias (D1 a 15/18 D4) fornece bons resultados. Para a frequência do nível 4 foi mantida parte dos coeficientes, ou seja, 3/18 de D4.

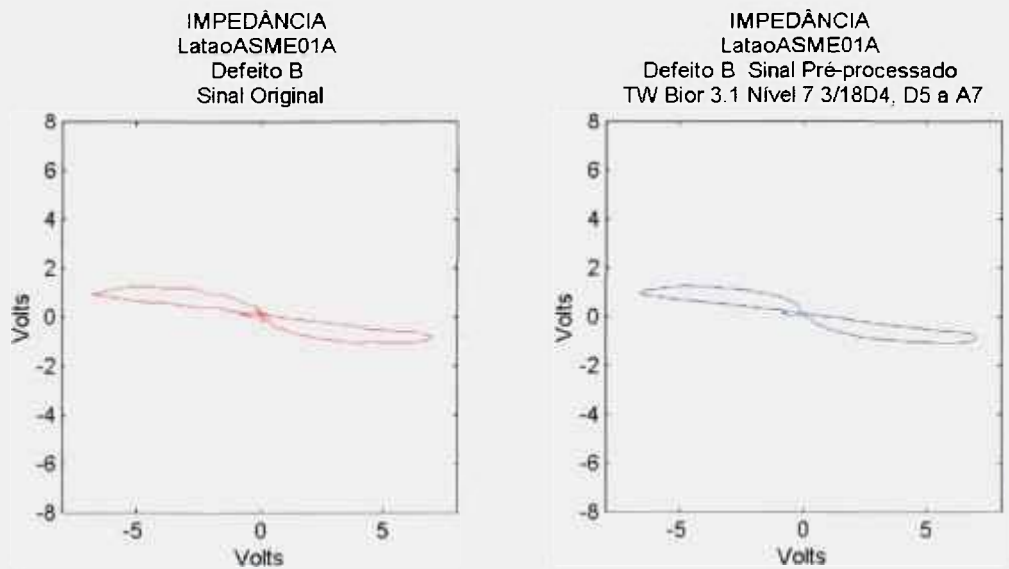


Figura 6.16: Remoção do RAS do sinal do defeito B do tubo LataoASME01

6.4.1.2 Remoção do RAS do Defeito C do tubo LataoASME01

A TW Symlets 5 foi aplicada para a remoção do RAS do sinal do defeito C do tubo LataoASME01 nos Níveis 3 e 7 de decomposição em frequência e com combinações diferentes de coeficientes, conforme apresentado na Figura 6.17.

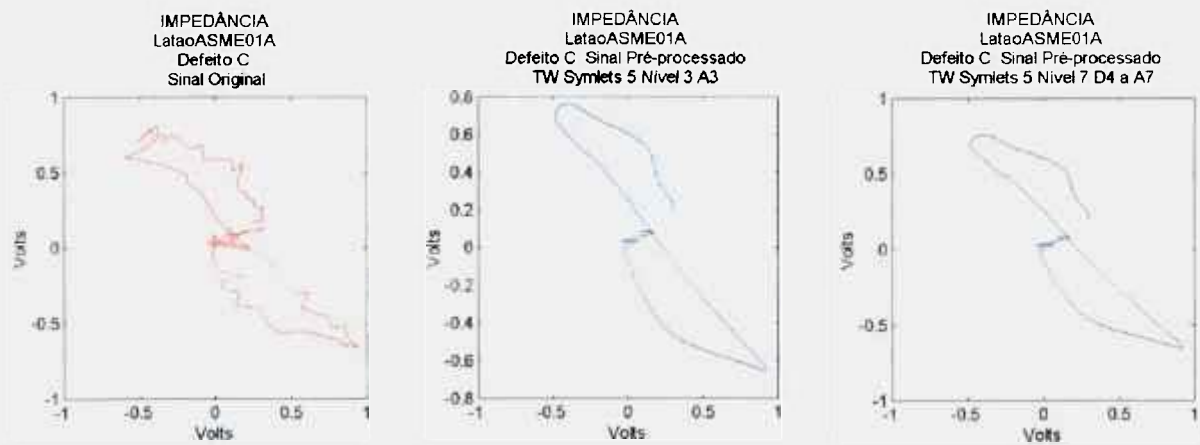


Figura 6.17: Remoção do RAS do sinal do defeito C do tubo LataoASME01 com a TW Symlet 5 Nível 3 A3 e Nível 7 D4 a A7

Da análise da Figura 6.17 para o sinal pré-processado com a TW Symlets 5, constata-se que a decomposição em 3 níveis com a manutenção da aproximação A3 (sinal DC) na reconstrução é equivalente à decomposição em 7 níveis com a remoção das frequências altas e médias-altas (D1 a D3).

6.4.1.3 Remoção do RAS do Defeito H do tubo LataoASME01

A TW Daubechies 8 foi aplicada para remoção do RAS do sinal do defeito H do tubo Latao ASME01 nos Níveis 2 e 7 de decomposição em frequência e com combinações diferentes de coeficientes conforme apresentado na Figura 6.18.

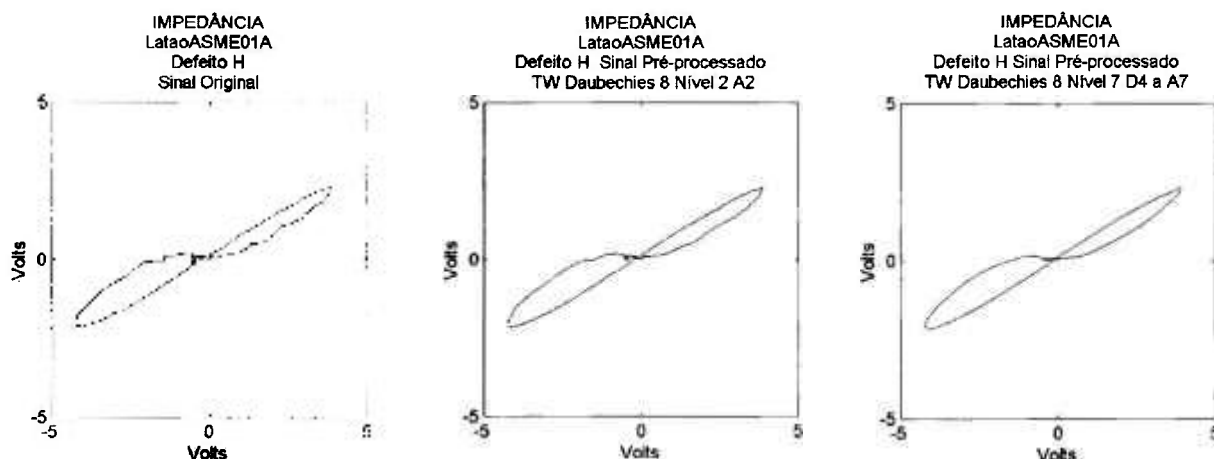


Figura 6.18: Remoção do RAS do sinal do defeito H do tubo LataoASME01 com a TW Daubechies 8 Nível 2 A2 e Nível 7 D4 a A7

Ao comparar os resultados da aplicação da TW Daubechies 8 em 2 níveis diferentes (2 e 7), constata-se que o resultado para o nível 7 é melhor que o resultado para o nível 2.

6.4.1.4 Remoção do RAS do Defeito G do tubo LataoASME01

A Figura 6.19 apresenta a remoção do RAS do sinal do defeito G do tubo LataoASME01A, através da TW Haar em 7 níveis de frequência, com a retirada da

frequência alta D1. O resultado não é bom e a remoção de frequências mais baixas leva a resultados piores.

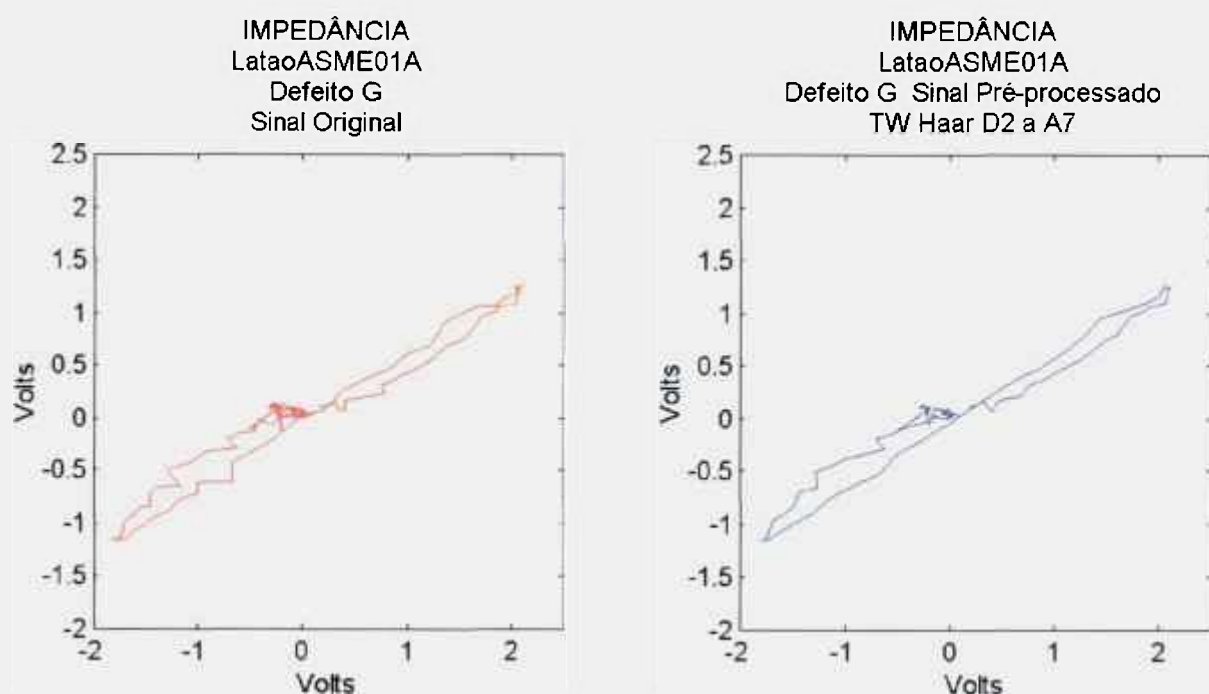


Figura 6.19: Remoção do RAS do sinal do defeito G do tubo LataoASME01A com a TW Haar Nível 7 D2 a A7

6.4.1.5 Remoção do RAS do Defeito A do tubo LataoDid04

Neste exemplo, foram realizados 3 pré-processamentos diferentes para o defeito A do tubo LataoDid04 com a utilização de duas TW's diferentes da família Biortogonal Reversa, ou seja, a Rbio 1.1 e 6.8 em 2 níveis diferentes (5 e 9) e comparados os resultados.

Na Figura 6.20, é comparada a Rbio 1.1 com a Rbio 6.8 em 5 níveis com remoções idênticas das frequências altas e médias chegando a resultados razoáveis e semelhantes, porém piores que aqueles obtidos com a aplicação da TW Db 10 em 8 níveis de frequência (vide Figura 6.15).

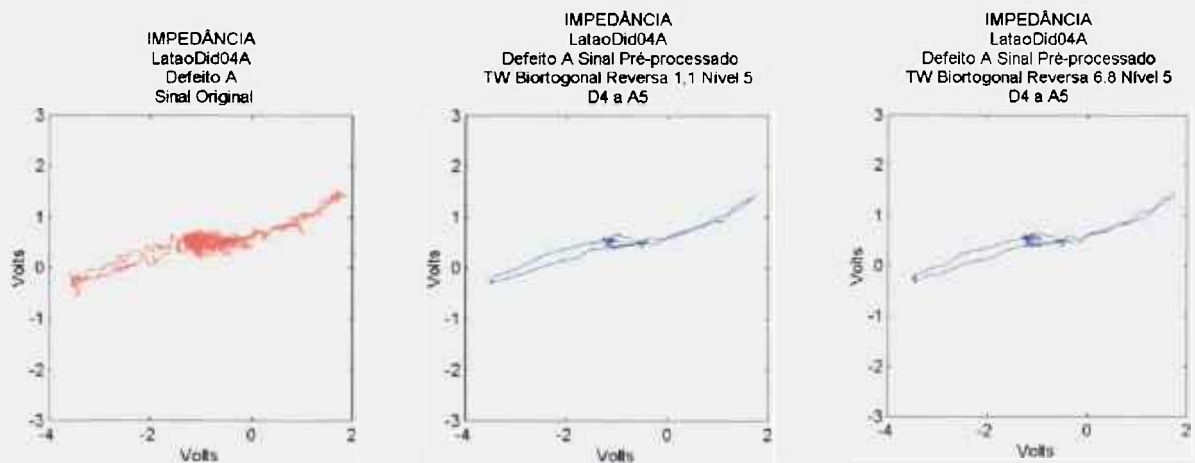


Figura 6.20: Comparação da remoção do RAS Rbio 1.1 x Rbio 6.8 N5 D4 a A5

Na Figura 6.21 compara-se a Rbio 6.8 em 2 níveis diferentes (5 e 9) com remoções idênticas das frequências baixas e baixas-médias onde se conclui que para o nível 9 de decomposição o resultado é melhor.

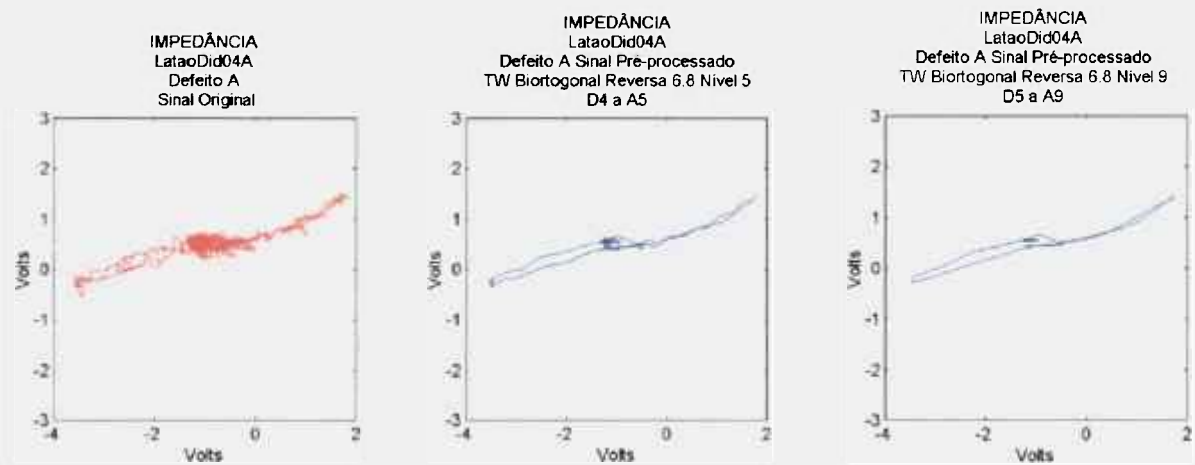


Figura 6.21: Remoção do RAS Rbio 6.8 N5 D4 a A5 x Rbio 6.8 N9 D4 a A5

6.4.1.6 Remoção do RAS do Defeito F do tubo InoxDid03 (Inconel 600)

Neste exemplo, foram realizados 2 pré-processamentos idênticos para o defeito F do tubo InoxDid03 (Inconel 600) porém utilizando Transformadas de Wavelets diferentes ou seja, Biortogonal Reversa 5.5 e Daubechies 5. Nos dois casos, a decomposição foi em 8 níveis e foram removidas as frequências altas e médias.

A comparação apresentada na Figura 6.22 revela que os resultados são bons e semelhantes.

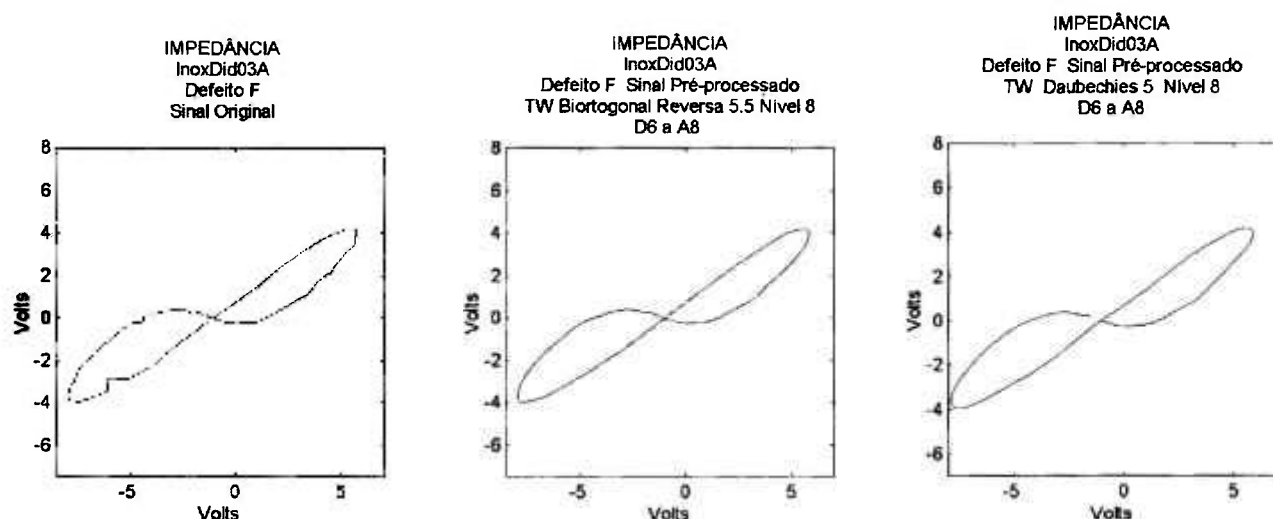


Figura 6.22: Remoção do RAS do sinal do defeito F do tubo InoxDid03 com as TW's Rbio 5.5 e Db5 Nível 8 D6 a A8

6.4.1.7 Conclusões sobre a remoção do RAS

A princípio, qualquer transformada, com exceção da Transformada de Wavelet Haar, pode ser utilizada para remover o RAS, desde que a decomposição do sinal seja realizada em, pelo menos, 5 níveis.

A TW Daubechies DbN oferece os melhores resultados desde que $N > 5$.

As TW's de ordens mais baixas das famílias de Wavelets tais como Daubechies 2, 3 e 4, Coiflets 1, 2 e 3 e Symlets 2, 3, e 4, fornecem piores resultados que as TW's de ordem média ou alta (acima de 5).

6.4.2 Remoção do Ruído do Material

Alguns sinais de Eddy-Current contêm um tipo de ruído, aqui denominado de Ruído do Material (RMT), que é causado por variações dimensionais e alterações das propriedades magnéticas do material, conseqüentes, por exemplo, do processo de fabricação de tubos com solda longitudinal, o que provoca distorções significativas na figura de Lissajous do defeito.

O RMT é mais pronunciado na componente da resistência do sinal, que é a componente mais afetada pelas variações de espessura do tubo e alterações magnéticas, o que compromete a extração de qualquer outra informação do sinal além dos valores da reatância indutiva. As Figuras 6.23 e 6.24 apresentam um tipo de sinal do qual não é possível extrair nem o ângulo de fase, pois a sua figura de Lissajous em nada se assemelha à figura de um “8”.

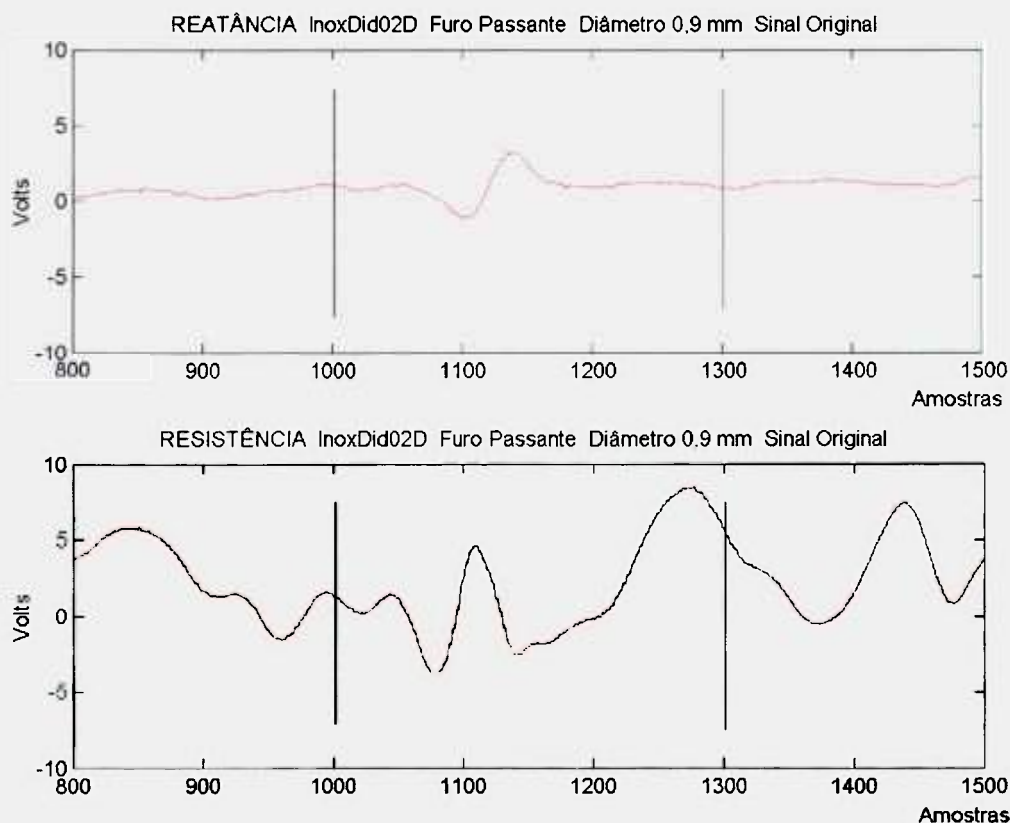


Figura 6.23: Resistência e reatância do furo passante $\varnothing$ 0,9 mm do tubo InoxDid02

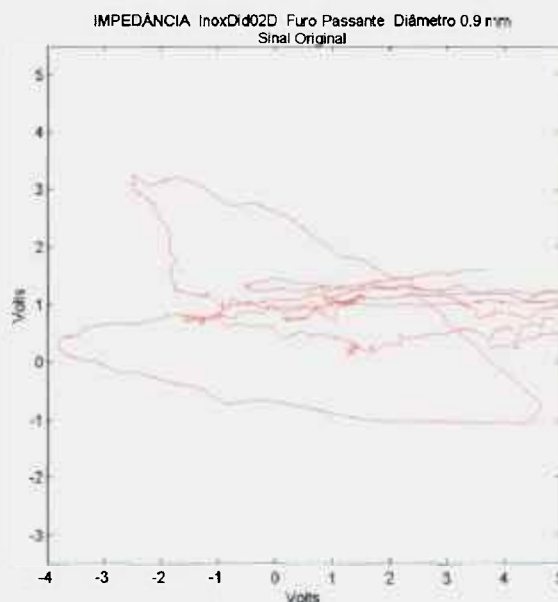


Figura 6.24: Impedância do furo passante $\varnothing 0,9$ mm do tubo InoxDid02

A distorção da figura foi provocada mais pelo ruído da componente da resistência do sinal do que pelo ruído da componente da reatância indutiva. No intervalo de amostras selecionado observa-se que a relação sinal-ruído da reatância é maior que 1 enquanto que para a resistência, a amplitude do sinal é menor que a amplitude do ruído.

O RMT é um ruído de baixa frequência e grande amplitude, que pode ser removido por uma técnica aqui proposta de pré-processamento do sinal e que consiste em retirar componentes em frequência do sinal com RMT por meio de uma combinação apropriada ou código dos coeficientes $C_{a,b}$ da Transformada de Wavelet.

O processo de remoção do RMT é aplicado separadamente à resistência e à reatância indutiva do sinal de um defeito conhecido, até que a sua figura de Lissajous assim pré-processada tenha a aparência de um “8” e apresente um ângulo de fase próximo do ângulo de fase do defeito conhecido.

O processo de transformação da figura de Lissajous depende unicamente da habilidade do executor do pré-processamento e poderá ser, futuramente, fuzzificado. Como resultado desse pré-processamento, são determinados a Transformada de Wavelet que melhor se aplica ao processo de remoção do RMT e o código de seus coeficientes.

As figuras de Lissajous assim pré-processadas podem então ser posteriormente processadas para a extração de características relacionadas com as dimensões dos defeitos.

Assim como é feita uma calibração da aparelhagem para a aquisição de sinais, a remoção do RMT pode ser considerada como uma calibração do sinal onde se determina uma TW e o código dos seus coeficientes. A seguir serão apresentados exemplos de pré-processamento de sinais para a remoção do RMT.

6.4.2.1 Remoção do RMT para o tubo InoxDid02

O material do tubo InoxDid02 é o aço inoxidável ASTM A-249-316L e o tubo foi produzido com solda longitudinal. O diâmetro externo do tubo é 19,05 mm com variação de $\pm 0,10$ mm. A espessura é 1,24 mm com variação de $\pm 0,10$ mm. A grande variação dimensional da espessura associada às alterações magnéticas resultantes da solda causam um grande RMT.

O sinal do furo passante $\varnothing 0,9$ mm do tubo InoxDid02 foi pré-processado com diversas TW's. A Figura 6.25 apresenta o resultado de um pré-processamento típico realizado com a TW Daubechies 5 em 8 Níveis com a remoção das componentes D1 a D3 de alta frequência da reatância indutiva e com a manutenção de apenas 2/13 da componente D6 de média-alta frequência da resistência.

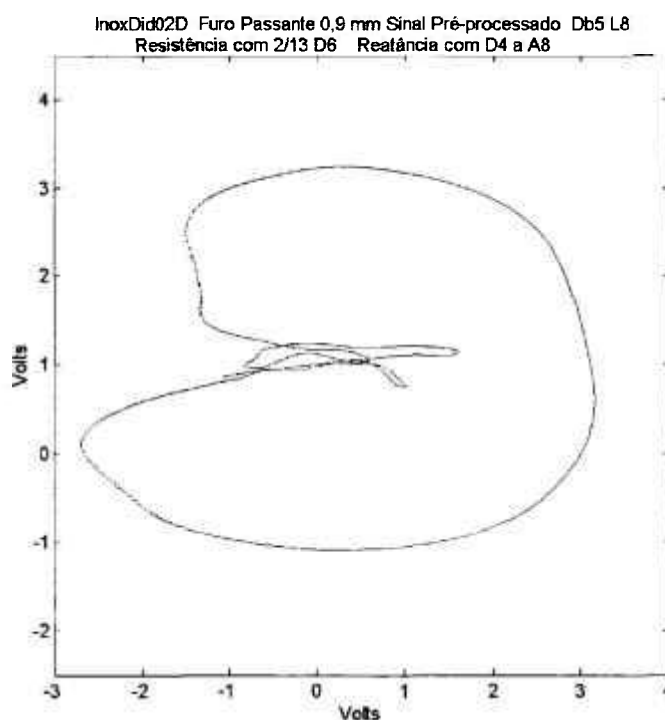


Figura 6.25: Pré-processamento do sinal do furo passante $\varnothing 0,9$ mm do tubo InoxDid02 com TW DB5 N8 R:2/13D6 X_L :D4 a A8

Observa-se na figura anterior que os limites em tensão da reatância foram mantidos iguais aos valores do sinal original. Observa-se também que, embora apresente um formato arredondado, compatível com a figura desejada de um “8” (sem pontas), a figura não apresenta um centro com cruzamento de linhas. Esta figura não apresenta as duas pétalas características das figuras de Lissajous dos sinais de Eddy-Current e não há como determinar o ângulo de fase.

Na Figura 6.26 é apresentado o resultado do pré-processamento realizado com a mesma Transformada de Wavelet, porém com uma outra combinação de coeficientes, ou seja, manutenção das frequências médias da resistência e remoção das altas frequências da reatância.

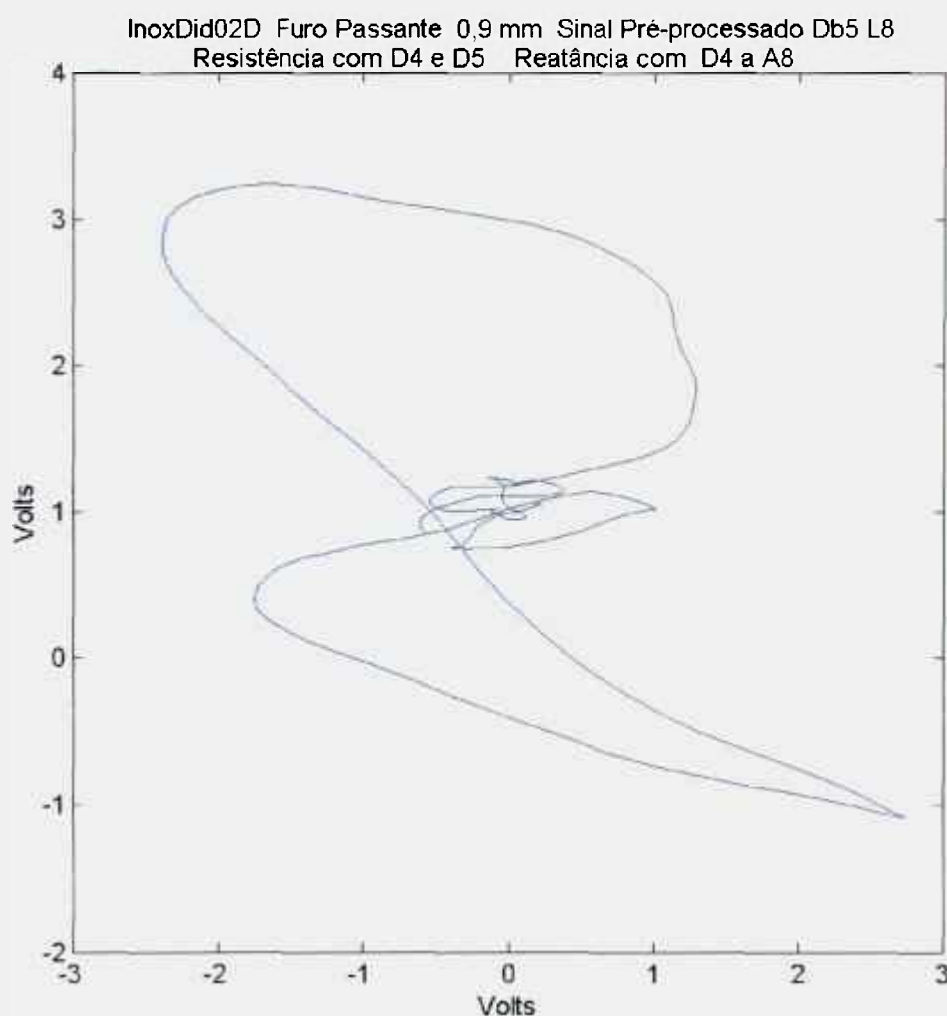


Figura 6.26: Pré-processamento do sinal do furo passante $\varnothing$ 0,9 mm do tubo InoxDid02D com TW Db5 N8 R:D4 e D5 X_L :D4 a A8

O resultado deste pré-processamento é melhor que o anterior pois a figura já apresenta cruzamento central de linhas e é possível determinar o ângulo de fase. No entanto, a pétala inferior é pontiaguda e muito diferente da pétala superior, o que leva a uma terceira tentativa, pois a figura de Lissajous deve ser aproximadamente simétrica, que é o formato característico de um furo passante. Tal como no primeiro pré-processamento, os limites de tensão da reatância foram respeitados.

Um terceiro pré-processamento é apresentado na Figura 6.27 onde foi gerada uma figura de Lissajous em forma de “8”, com duas pétalas semelhantes e com um ângulo de fase que pode ser determinado. Para tanto, foi utilizada a mesma Transformada de Wavelet Daubechies 5 em 8 níveis de decomposição em frequência, com a remoção das frequências baixas da reatância (D1 a D4 e 14/18 D5) e com a manutenção de 2/18 da frequência média da resistência, isto é, do nível 5 de decomposição do sinal.

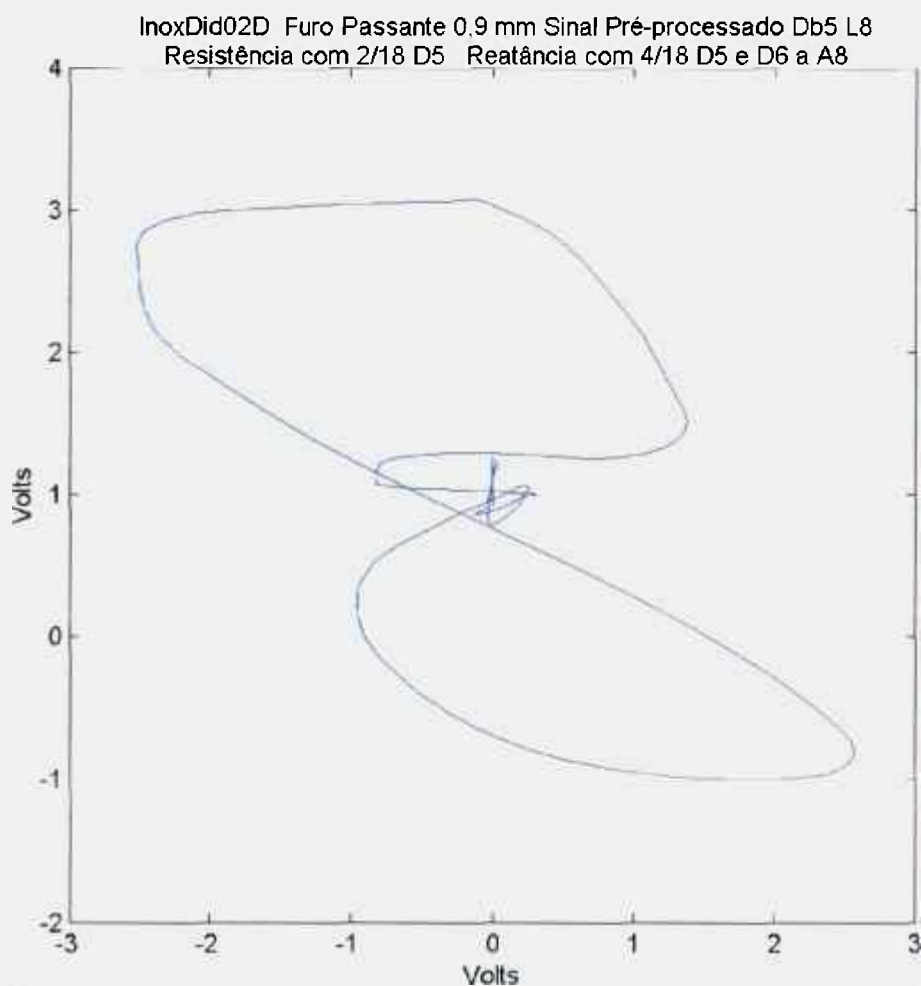


Figura 6.27: Pré-processamento do sinal do furo passante $\varnothing$ 0,9 mm do tubo InoxDid02D com a TW Db5N8 R: 2/18D5 X_L : 4/18D5 e D6 a A8

O melhor pré-processamento, **apresentado** na Figura 6.28, gerou uma figura de Lissajous muito parecida com a **anterior**, onde foi utilizado o mesmo código para a resistência (2/18 D5). Da reatância indutiva foram removidas as duas frequências mais baixas D1 e D2. A permanência das frequências a partir da D3 distorceu a pétala inferior porém reduziu as dimensões da pétala superior tornando as pétalas mais parecidas, o que era desejado, pois a figura de Lissajous de um furo passante deve apresentar pétalas semelhantes. O ângulo de fase pôde ser determinado e os limites em amplitude da reatância foram preservados.

As Figuras 6.29 e 6.30 apresentam o processo de decomposição e recomposição final da reatância e da resistência do sinal, realizado segundo a técnica acima proposta.

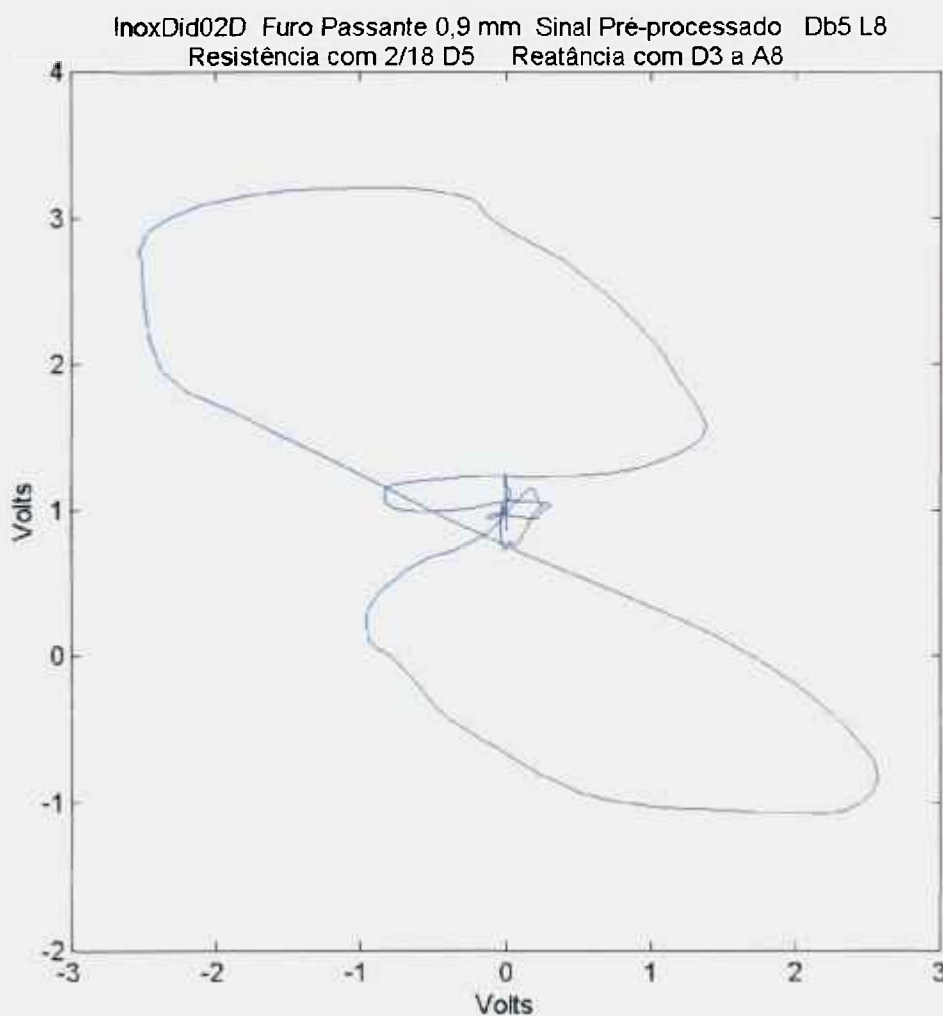


Figura 6.28: Melhor pré-processamento do sinal do furo passante $\varnothing 0,9$ mm do tubo InoxDid02D com a TW Db5N8 R: 2/18D5 X_L : D3 a A8

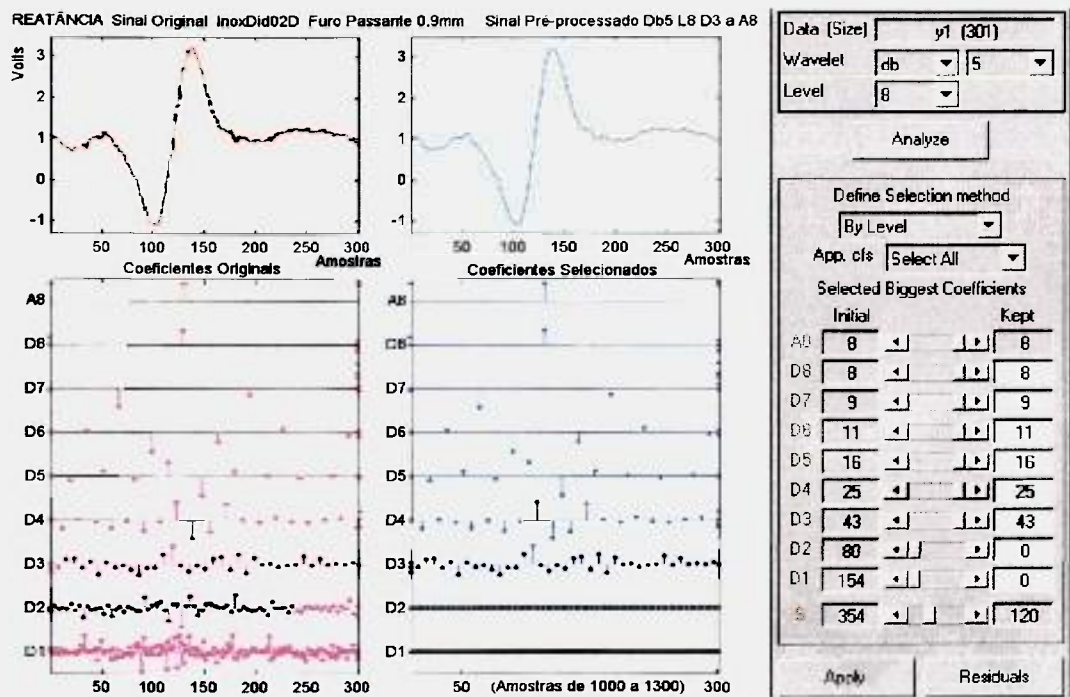


Figura 6.29: Melhor pré-processamento da reatância do sinal do furo passante Ø 0,9 mm do tubo InoxDid02D

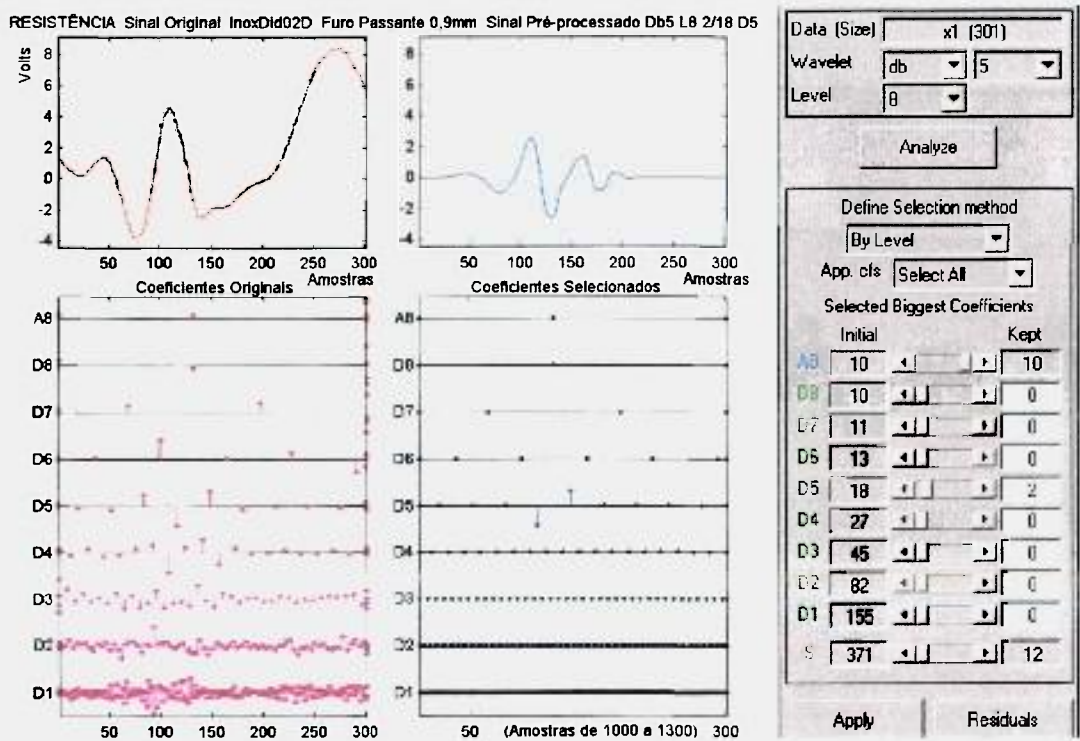


Figura 6.30: Melhor pré-processamento da resistência do sinal do furo passante Ø 0,9 mm do tubo InoxDid02D

6.4.2.2 Remoção do RMT para o tubo InoxDid01

A especificação do tubo InoxDid01 é a mesma do tubo InoxDid02, o diâmetro e a espessura são iguais, porém os tubos não foram produzidos pelo mesmo fabricante. A Figura 6.31 apresenta as figuras de Lissajous dos sinais originais dos defeitos A e B desse tubo. Ambos são furos cegos externos Ø 2,0 mm, sendo que as profundidades desses defeitos são, respectivamente, 40% e 60% da espessura da parede do tubo.

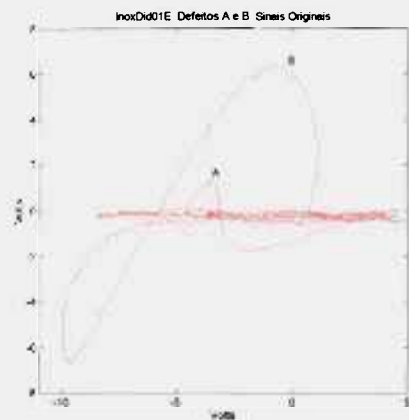


Figura 6.31: Sinal original dos defeitos A e B do tubo InoxDid01

Os sinais desses defeitos sofreram a influência do RMT que pode ser visualizado como uma grande concentração horizontal no centro do plano da impedância, característica típica desse tipo de ruído. A aparelhagem foi corretamente calibrada pois o ângulo de fase do RMT é zero. Na Figura 6.32 pode-se comparar as amplitudes da reatância indutiva e da resistência do sinal original.

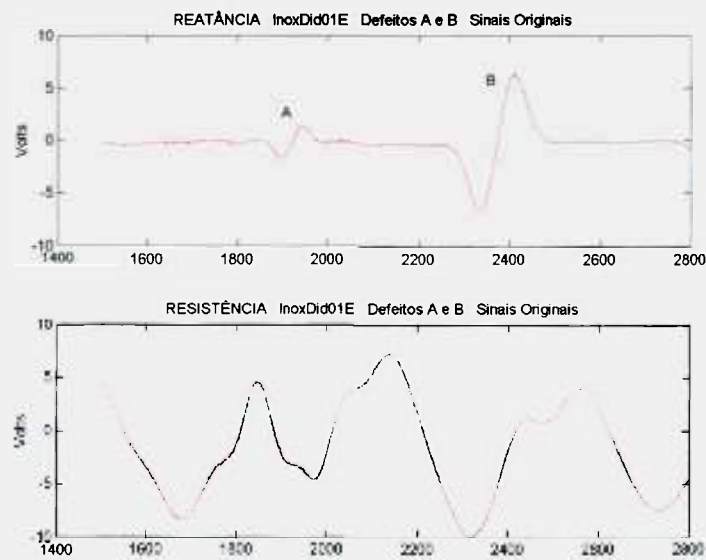


Figura 6.32: Resistência e Reatância dos defeitos A e B do tubo InoxDid01

O sinal do defeito A foi isolado e pré-processado primeiramente com a TW Biortogonal 3.9 em 7 níveis de frequência, conforme apresentado na Figura 6.33, sendo que para a resistência foi mantida parte das frequências média-baixas 2/26 D5 e 2/22 D6 e para a reatância foram mantidas as frequências baixas D5 a A7.

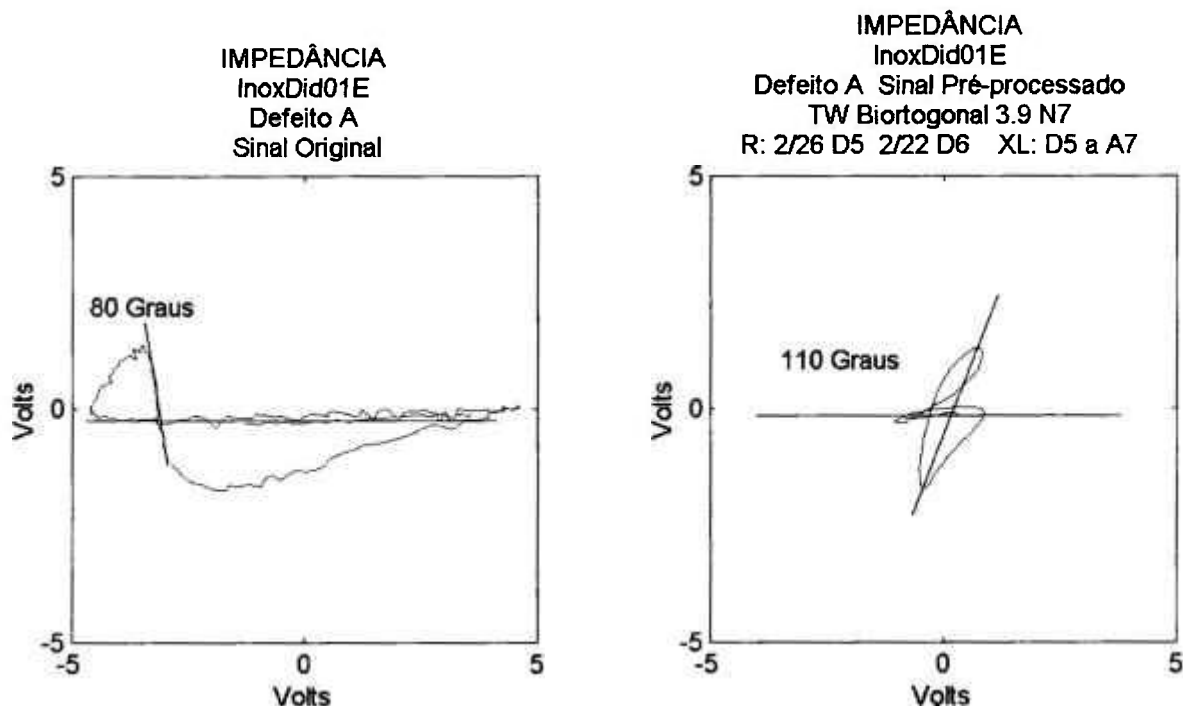


Figura 6.33: Remoção do RMT do sinal do defeito A do tubo InoxDid01E com a TW Biortogonal 3.9 em 7 níveis

A figura de Lissajous do sinal original apresenta um ângulo de fase de aproximadamente 80° o que é incompatível com a curva de calibração, pois um furo cego externo com profundidade de 40% da espessura da parede do tubo deve apresentar um ângulo de fase de aproximadamente 120° . O sinal pré-processado apresenta um ângulo de fase de 110° . O uso da TW Biortogonal 3.9 em 7 níveis não permite a geração de uma figura de Lissajous melhorada e que se assemelhe mais a um “8”.

O sinal do defeito A também foi pré-processado com a TW Daubechies 5 em 7 níveis de frequência conforme apresentado na Figura 6.34, sendo que para a resistência foi mantida parte das frequências média-baixas 3/16 D5 e 1/12 D6 e para a reatância foram mantidas as frequências baixas D5 a A7, que é um código semelhante ao código utilizado para a TW Biortogonal 3.9 N7.

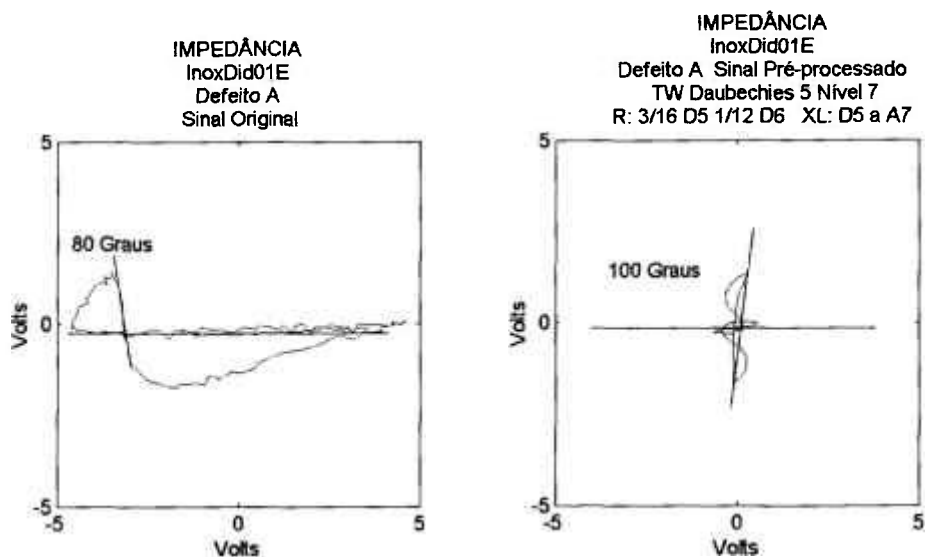


Figura 6.34: Remoção do RMT do sinal do defeito A do tubo InoxDid01E com a TW Daubechies 5 em 7 níveis

O resultado do pré-processamento com a TW Daubechies é melhor que o resultado com a TW Biortogonal pois a figura de Lissajous apresenta mais simetria, o que é desejável pois o defeito é simétrico. O ângulo de fase de 100° resultou menor que o valor desejável de aproximadamente 120° que é o valor correspondente a um defeito com 40% de profundidade. No entanto, esse valor é aceitável pois a tolerância nas leituras do ângulo de fase é de $\pm 10^\circ$.

A Figura 6.35 apresenta o sinal original do defeito B do tubo InoxDid01.

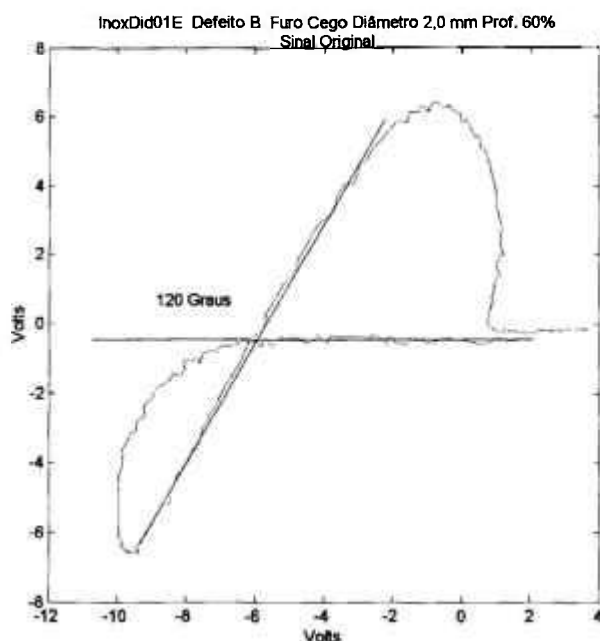


Figura 6.35: Sinal original do defeito B do tubo InoxDid01

Aparentemente o sinal apresenta uma distorção causada pelo RMT influenciando na resistência do sinal apenas na pétala superior.

No entanto, segundo a curva de calibração, um defeito externo com uma profundidade de 60% deve apresentar um ângulo de fase de aproximadamente 90° , o que leva à conclusão que esta figura de Lissajous foi **distorcida** na sua totalidade.

O pré-processamento deste sinal foi **realizado** com diversas TW's. A Figura 6.36 apresenta o resultado do pré-processamento utilizando a TW Biortogonal 3.5 em 8 níveis.

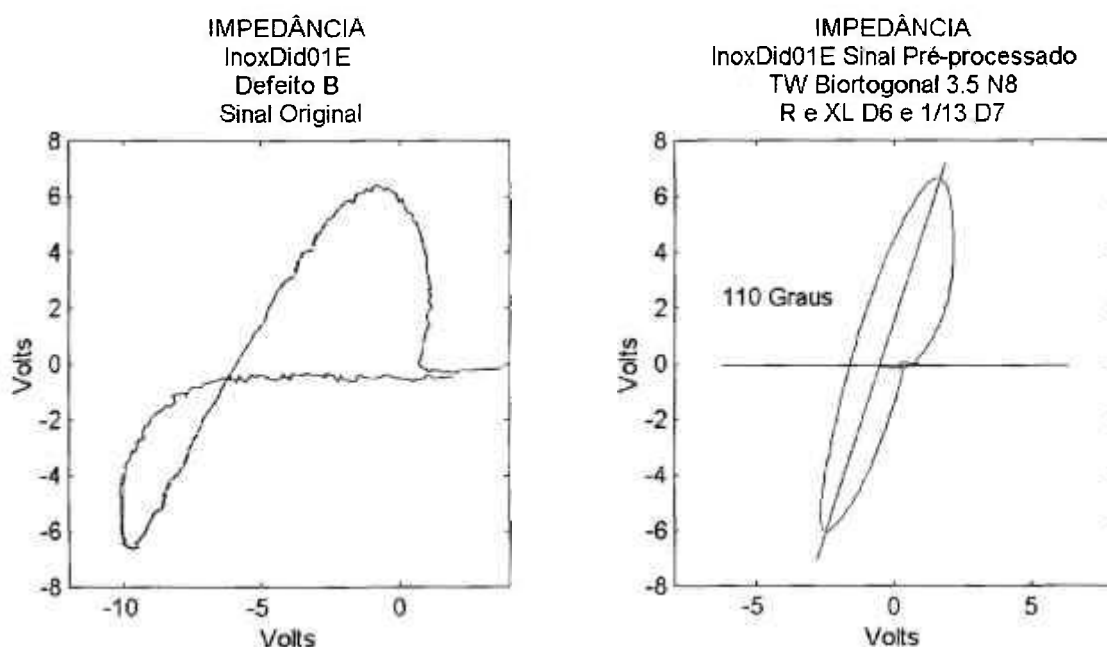


Figura 6.36: Pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoxDid01 com a TW Bior 3.5 N8 R e X_L D6 e 1/13 D7

A Figura 6.37 apresenta o pré-processamento utilizando a TW Biortogonal Reversa 4.4 também em 8 níveis.

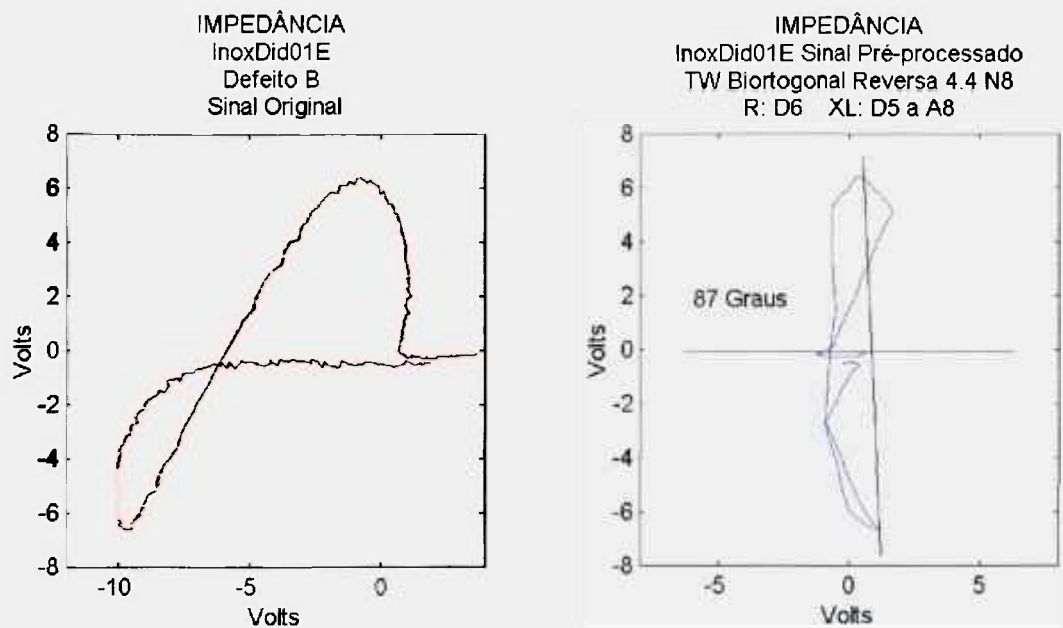


Figura 6.37: Pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoxDid01 com a TW Biortogonal Reversa 4.4 N8 R: D6 e XL: D5 a A8

A Figura 6.38 apresenta o melhor resultado do pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoxDid01E onde foi utilizada a TW Daubechies 5 também em 8 níveis.

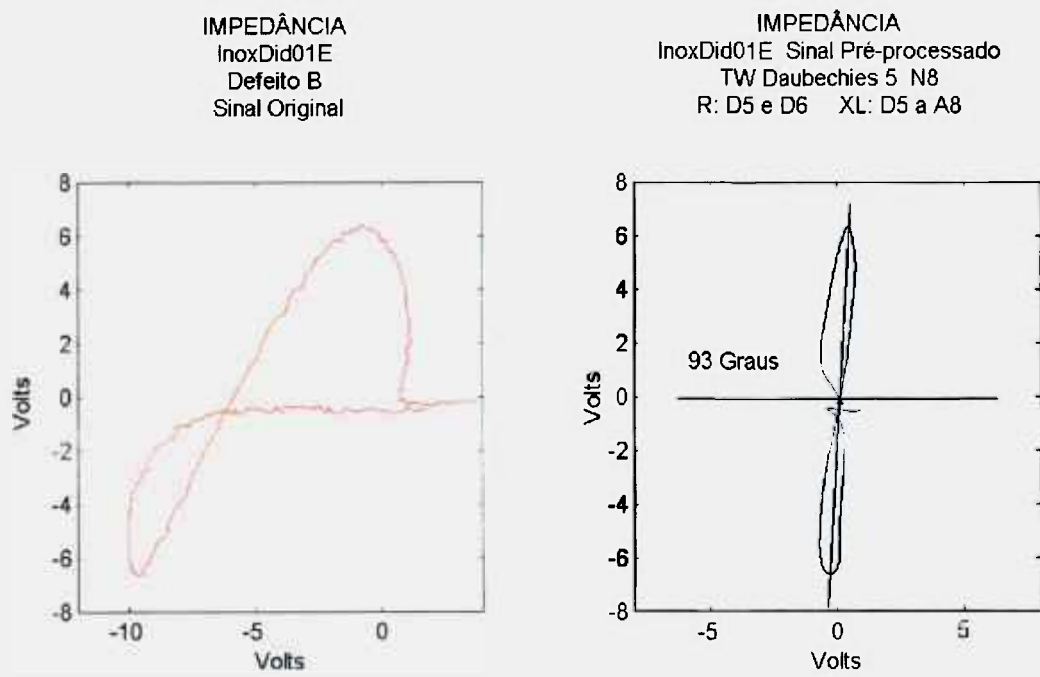


Figura 6.38: Melhor pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoxDid01

A Figura 6.39 apresenta as decomposições da resistência e da reatância indutiva do sinal do defeito B do tubo InoxDid01 com a Transformada de Wavelet Daubechies 5 em 8 Níveis de frequência.

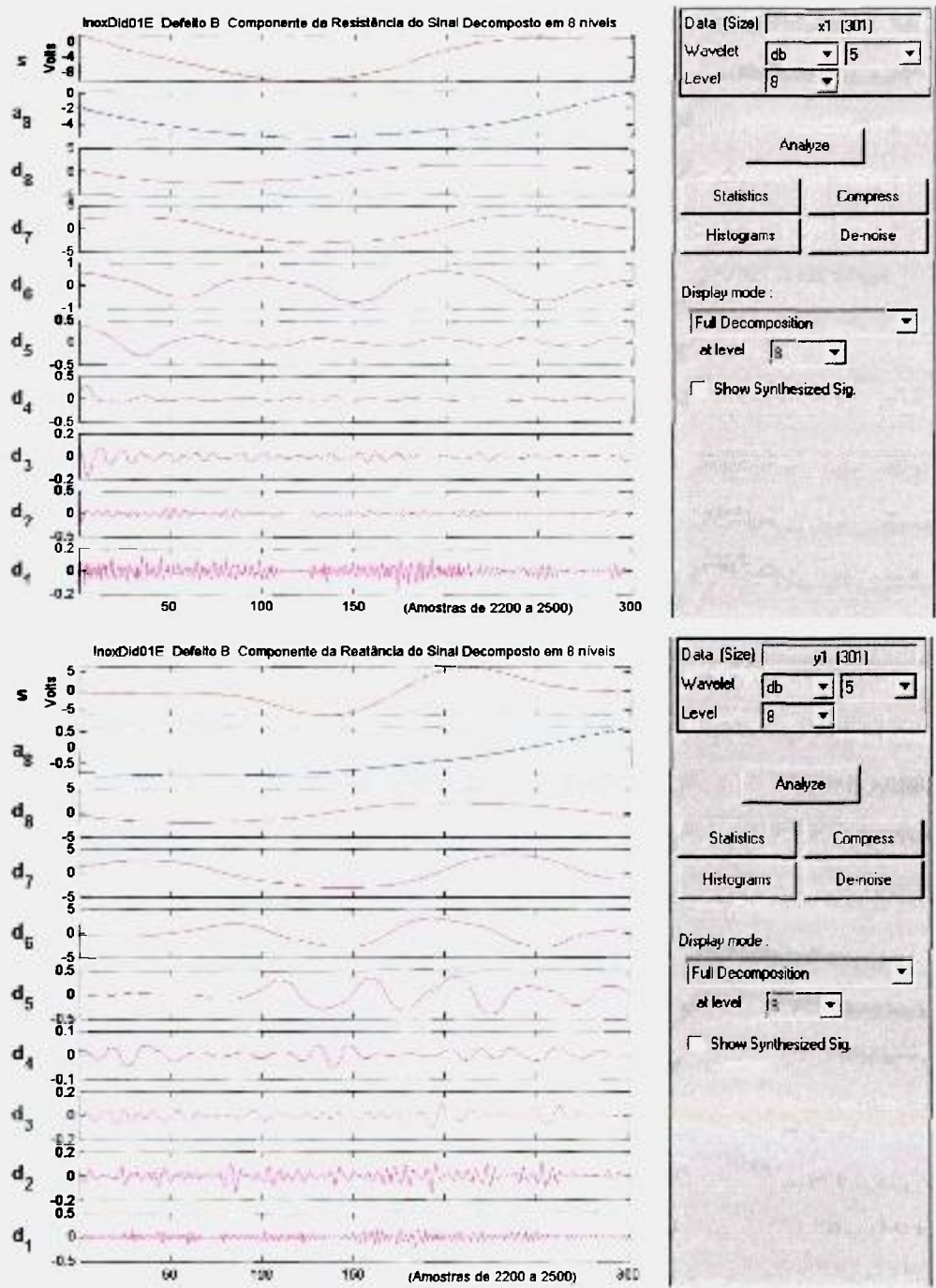


Figura 6.39: Resistência e reatância do sinal do defeito B do tubo InoxDid01 decompostas com a TW Daubechies 5 em 8 níveis

A Figura 6.40 apresenta o processo de pré-processamento através da seleção dos coeficientes dos níveis de frequência de decomposição do sinal com a Transformada de Wavelet Daubechies 5.

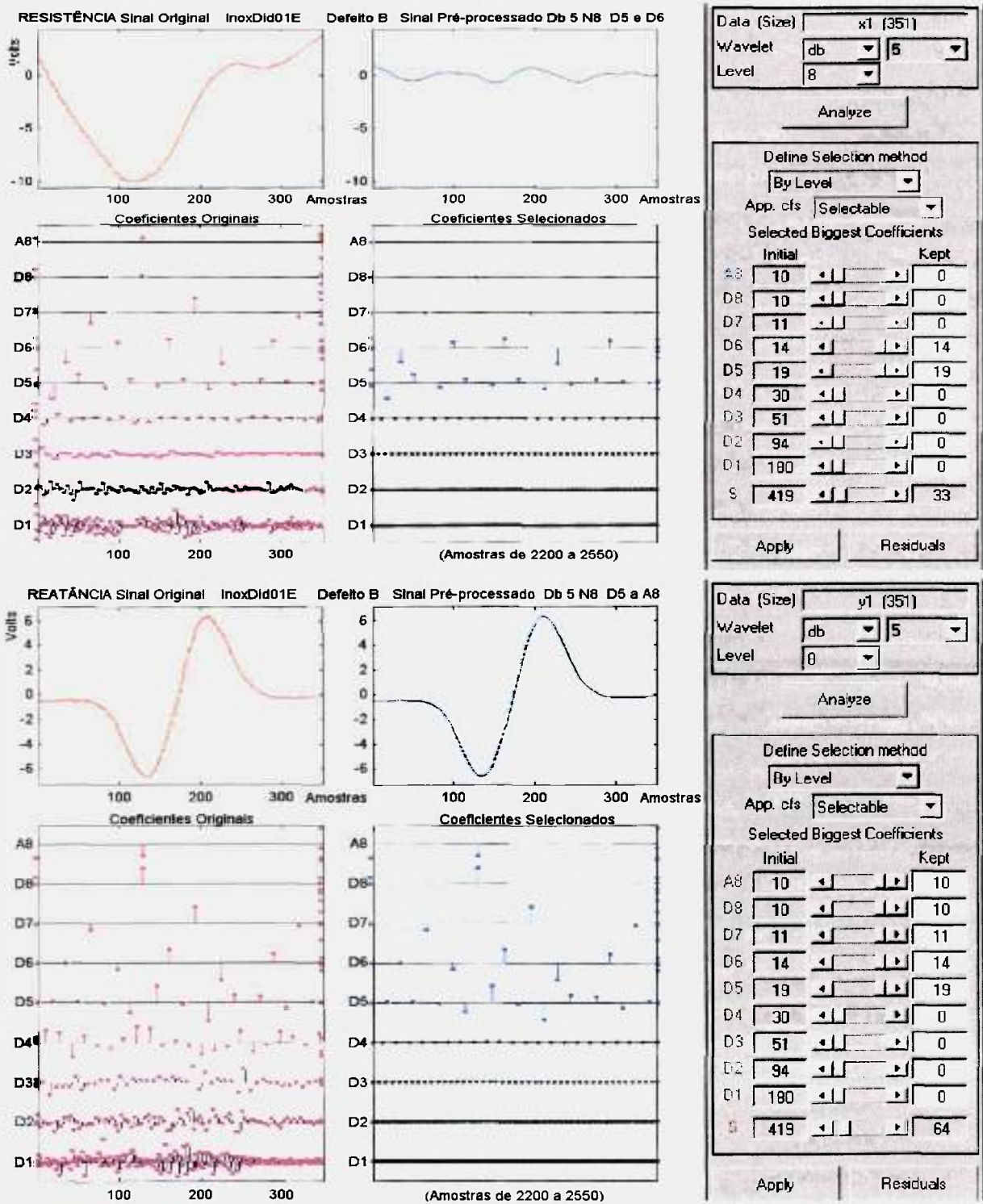


Figura 6.40: Seleção dos coeficientes no pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoXDid01 com a TW Daubechies 5 em 8 níveis

6.4.2.3 Conclusões sobre a técnica de remoção do RMT

A técnica proposta para a remoção do RMT por meio da seleção da melhor Transformada de Wavelet e o correspondente código de coeficientes, oferece resultados satisfatórios conforme apresentado. No entanto, constatou-se que a TW e o código obtidos para um defeito quando aplicados a outros defeitos de um mesmo tubo, melhoram muito as figuras de Lissajous porém com uma eficiência menor.

Como exemplo, ao se utilizar o código TW Db5 N8 R: 2/18 D5 e X_L : D3 a A8, obtido para o furo passante $\varnothing$ 0,9 mm do tubo InoxDid02, no furo passante $\varnothing$ 1,1 mm desse mesmo tubo, a figura de Lissajous totalmente distorcida evolui para uma figura de Lissajous em forma de “8” porém com as pétalas desproporcionais, conforme apresenta a Figura 6.41, onde são comparados os resultados da aplicação dos mesmos TW e código para os dois defeitos.

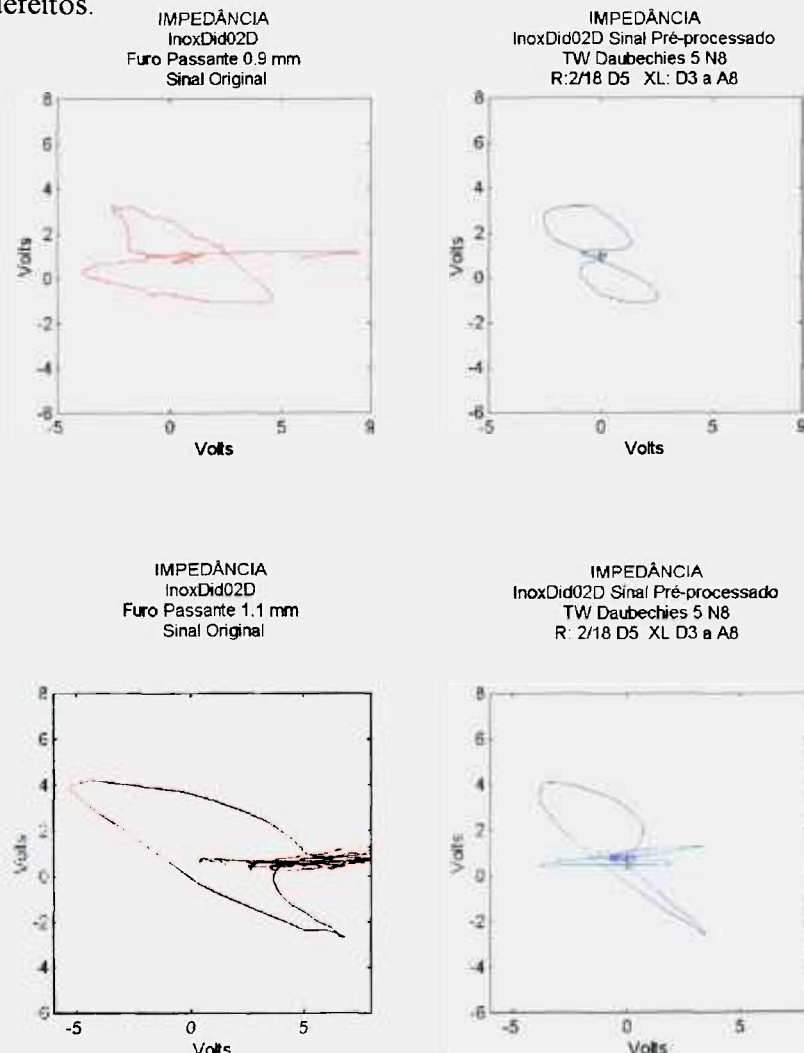


Figura 6.41: Comparação dos resultados da utilização da TW e do código de um defeito do tubo InoxDid02 no outro defeito.

Cabe ressaltar a importância deste método pois as duas figuras em vermelho na Figura 6.41 representam um mesmo tipo de defeito, ou seja, furo passante e deveriam ser semelhantes apresentando diferenças apenas na amplitude.

Um outro exemplo é apresentado na Figura 6.42, onde o sinal pré-processado pela TW Daubechies 5 N8 com o código de coeficientes R: D5 e D6 e XL: D5 a A8, obtido para o defeito B (furo externo Ø 2,0 mm, profundidade de 60%), ao ser aplicado ao defeito I (furo externo Ø 2,0 mm, profundidade 50%), localizado na outra extremidade do tubo, gera uma figura de Lissajous com o ângulo de fase correto porém nitidamente deformada por um resíduo de RMT agindo na resistência do sinal.

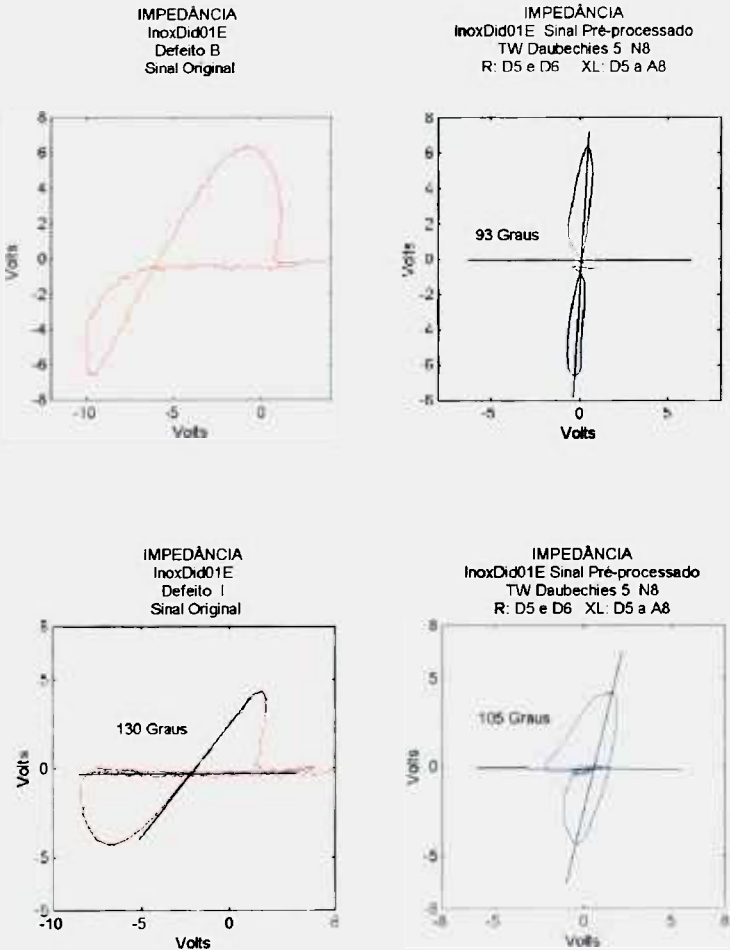


Figura 6.42: Comparação dos resultados da utilização da TW e do código de um defeito do tubo InoxDid01 em outro defeito.

A redução na eficiência da remoção do RMT, observada quando a TW e o código de um defeito são aplicados a outro defeito deve-se ao fato do ruído proveniente do material variar ao longo do tubo, consequência do processo de fabricação, o que exigiria a determinação de um novo código ou, até mesmo, uma nova TW mais apropriada.

TW's diferentes porém com funções Wavelets básicas semelhantes fornecem resultados semelhantes, conforme pode ser observado pela comparação dos dois pré-processamentos do defeito A do tubo InoxDid01, comparados na Figura 6.43.

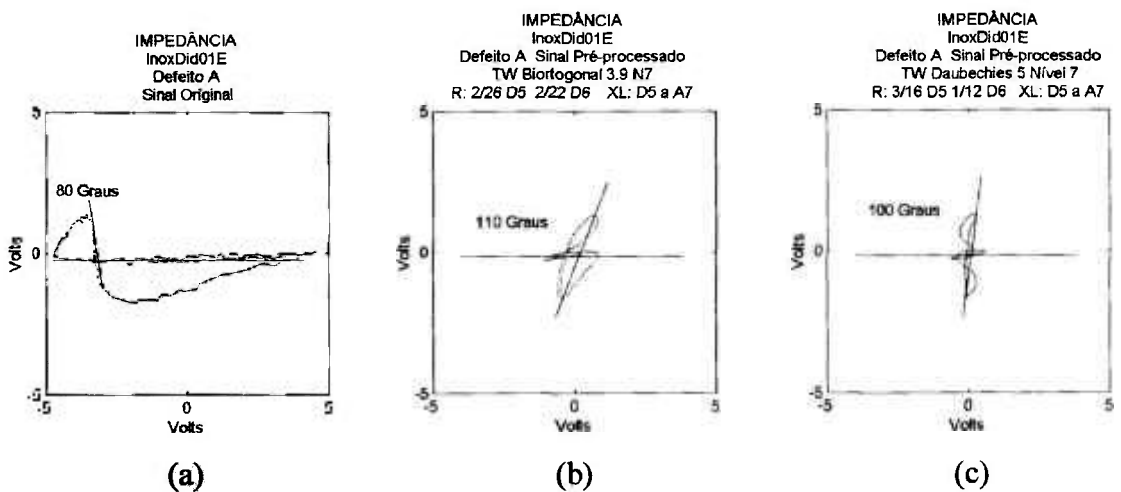


Figura 6.43: Pré-processamentos do sinal do defeito A do tubo InoxDid01 com duas TW's diferentes

O pré-processamento apresentado na Figura 6.43(b) foi realizado com a TW Biortogonal 3.9 em 7 níveis de decomposição em frequência, enquanto que no pré-processamento apresentado na Figura 6.43(c) foi utilizada a TW Daubechies 5 em 7 níveis. Os códigos para a resistência são semelhantes enquanto que os códigos para a reatância indutiva são iguais.

A semelhança nos códigos de pré-processamento das TW's Biortogonal e Daubechies deve-se à própria semelhança das funções Wavelets básicas dessas transformadas, como ilustra a Figura 6.44.

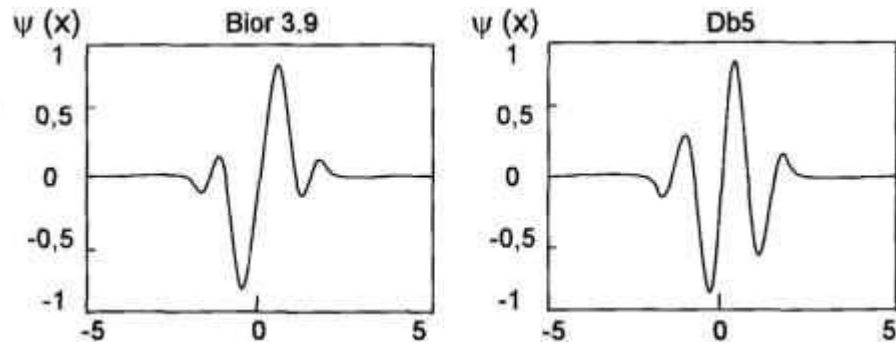


Figura 6.44: Funções Wavelets básicas Biortogonal e Daubechies

O RMT é melhor removido com Transformadas de Wavelets em níveis médios a altos de decomposição, ou seja, de 5 a 8, e as melhores TW's das famílias de Wavelets são aquelas de ordem média pois suas funções se ajustam melhor aos sinais de Eddy-Current.

Finalmente, o processo de remoção do RMT com a determinação do código dos coeficientes da Transformada de Wavelet depende da realização de diversos pré-processamentos, com diversas TW's, em diversos níveis de decomposição e em diversos defeitos conhecidos produzidos ao longo de uma extensão de tubo que represente todo um lote.

Uma relação geral entre a variação do código dos coeficientes e o comprimento do tubo, que atenda todos os sinais dos defeitos poderá ser obtido por meio de técnicas de inteligência artificial.

6.4.3 Remoção do efeito “Lift-off” por meio de Transformadas de Wavelets

Nas inspeções por meio de Eddy-Current, as sondas de inspeção devem percorrer livremente o interior do tubo inspecionado. O diâmetro externo da sonda deve ser menor que o diâmetro interno do tubo, existindo entre a sonda e o tubo uma folga apropriada que leva à flutuação da sonda ou efeito “Lift-off”.

Devido a essa flutuação, a distância entre as bobinas e a superfície interna do tubo varia. O campo magnético é maior próximo das bobinas e diminui com o aumento da distância entre a sonda e o tubo.

O resultado é uma variação média não desejada nos valores da reatância conforme apresenta, como exemplo, a Figura 6.45 para os sinais do tubo InoxDid02.

O efeito “Lift-off” é um ruído de baixa frequência e grande amplitude, cuja remoção pode ser realizada por meio de TW’s conforme apresentado na Figura 6.46, onde foi utilizada a Transformada de Wavelet Biortogonal 1.3 para a remoção das baixas frequências do sinal.

Basicamente, qualquer Transformada de Wavelet pode ser utilizada para a remoção do efeito “Lift-off”. No entanto, as TW’s de ordens mais altas e com maiores níveis de decomposição fornecem os melhores resultados.

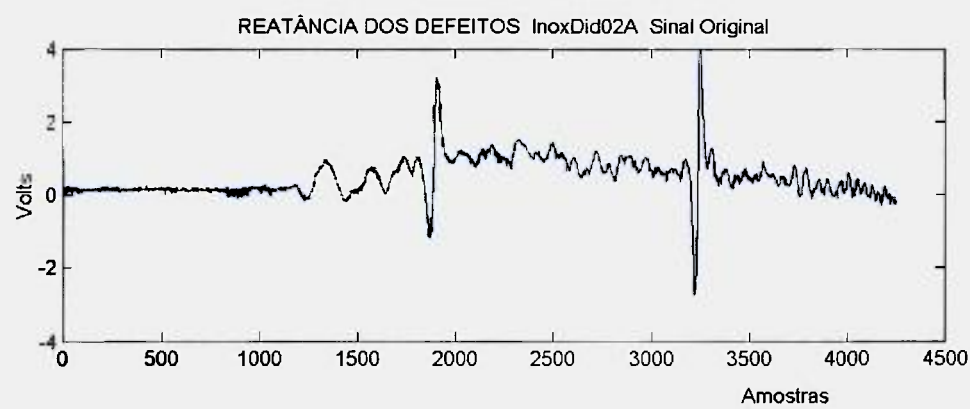


Figura 6.45: Reatância dos defeitos do tubo InoxDid0 2 com o efeito “Lift-off”

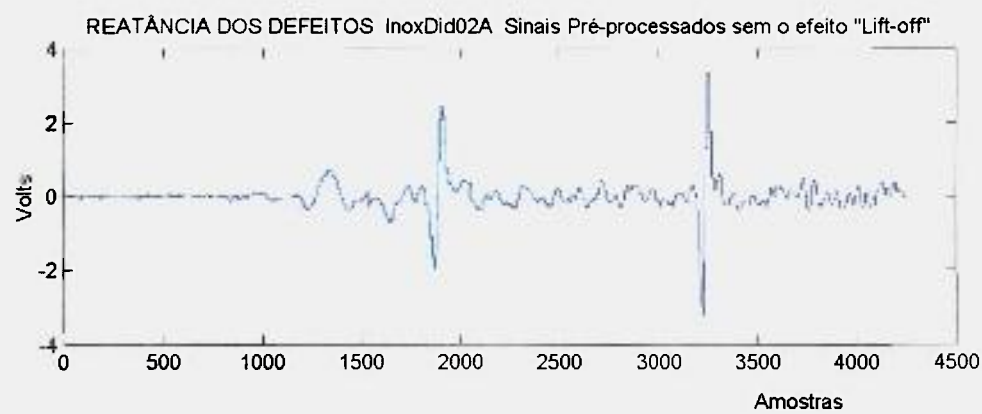


Figura 6.46: Reatância dos defeitos do tubo InoxDid02 sem o efeito “Lift-off”

7. PROCESSAMENTO DE SINAIS E SISTEMA FUZZY

O processamento de sinais tem como objetivo extrair informações que permitam a detecção, a localização, a classificação e o dimensionamento de defeitos. Essas informações são as características normalmente lidas pelos inspetores de Eddy-Current ângulo de fase e picos de reatância, e novas características propostas neste trabalho.

Das características normalmente lidas pelos inspetores, somente o ângulo de fase é normalizado pelo ASME (1992). O pico de reatância é uma característica comumente utilizada pelos inspetores, porém não normalizada.

As novas características propostas neste trabalho são as medidas das aberturas e das amplitudes das duas pétalas do sinal bem como a sua formação. A identificação de novas características dos sinais visando a classificação e o dimensionamento de defeitos por meio de sondas circunferenciais é uma contribuição original deste trabalho.

Para o processamento de mais de 100 arquivos de sinais adquiridos, correspondentes a defeitos artificiais produzidos por usinagem ou por eletroerosão em tubos de latão ou aço inox e defeitos reais em tubos de aço inox, foi concebido um Programa de Processamento de Sinais (PPS) em MATLAB que detecta, conta, localiza e exibe os sinais, bem como lê automaticamente as suas características.

A detecção e a localização de defeitos são feitas pela análise da amplitude da componente da reatância do sinal e da relação entre a frequência de amostragem e o número da amostra.

A classificação e o dimensionamento de defeitos são realizados por um sistema nebuloso ou Fuzzy de inteligência artificial que tem como entradas as características extraídas dos sinais. Como saídas, o sistema Fuzzy fornece a classificação de um defeito em interno ou externo, localizado ou extenso, simétrico ou assimétrico e com profundidade aumentando, diminuindo ou constante. Também é fornecido um dimensionamento aproximado do defeito com a sua profundidade e o seu volume.

7.1 Lógica Fuzzy

Segundo o pensamento científico tradicional, o entendimento de um fenômeno está relacionado com a habilidade de equacioná-lo em termos quantitativos. No entanto, problemas tais como a análise de sinais de Eddy-Current, são solucionados com menor eficiência quando tratados de maneira exata por meio de diferenças, diferenciais ou equações integrais. A base desta ineficiência pode ser chamada de princípio da incompatibilidade, ou seja, conforme aumenta a complexidade de um problema, diminui a nossa capacidade ou habilidade de estabelecer opiniões significantes e precisas sobre o seu comportamento, até que um limite é atingido, abaixo do qual, a precisão e a significância (ou relevância) são comprometidas (Zadeh, 1973).

Uma forma alternativa de tratar este problema é baseada na premissa de que os elementos-chaves do pensamento humano não são números, mas classificações de conjuntos nebulosos, ou seja, classes de finalidades, nas quais a transição de associação para não associação é gradual e não abrupta. Na verdade, a postura de imprecisão dos seres humanos sugere que a maior parte da lógica do comportamento humano não é baseada nos valores tradicionais do certo ou do errado, ou do sim ou do não, mas da lógica multivalorada, das verdades nebulosas, ligações nebulosas e regras nebulosas de inferência (Zadeh, *et al.*, 1968).

Uma das mais importantes facetas do pensamento humano é a habilidade de sumarizar informações, ou seja, extrair de conjuntos de dados somente os subconjuntos relevantes, e isto não requer muita precisão. Assim, a mente humana extrai da corrente de informações que a atinge por meio da visão, audição, tato, etc., somente o mínimo necessário para atingir uma meta com um mínimo de precisão (Zadeh, 1965).

A habilidade de manipular conjuntos nebulosos ou Fuzzy e a conseqüente capacidade de sumariá-los é o que diferencia a inteligência humana da inteligência computacional tradicional. Hoje, a inteligência artificial está alterando e diminuindo essa diferença (Reifman, 1997).

Os métodos convencionais de análise de sinais de Eddy-Current são intrinsicamente inadequados para tratar o problema da interpretação da grande quantidade de informações obtidas com o processamento dos sinais de Eddy-Current obtidos. Para

tanto, necessita-se de uma rede metodológica compatível com a imprecisão e a verdade parcial, e que tenha as características apresentadas a seguir.

7.1.1 Variáveis linguísticas e variáveis numéricas

O uso da linguagem natural é uma das formas de manifestação da habilidade humana de sumarização. Cada palavra x na linguagem natural L pode ser interpretada como uma descrição sumarizada de um subconjunto nebuloso $M(x)$ de um universo de discurso U , onde $M(x)$ representa o significado de x . Assim, a linguagem como um todo pode ser entendida como um sistema que atribui classificações singulares ou compostas, ou seja, palavras, frases e sentenças, para os subconjuntos nebulosos de U .

As variáveis linguísticas proporcionam um modo sistemático de caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Portanto, deixando de utilizar variáveis quantitativas e partindo para o uso das descrições linguísticas típicas dos seres humanos, adquire-se a capacidade de solucionar problemas que são muito complexos para serem analisados pelos meios matemáticos convencionais (Zadeh, 1973).

7.1.2 Algoritmos nebulosos

Na análise quantitativa, a dependência entre duas variáveis x e y numericamente valoradas é normalmente caracterizada por uma tabela na qual utilizam-se palavras que expressam considerações condicionais da forma SE x é *isto* ENTÃO y é *aquilo*, ou seja a forma canônica da relação entre antecedente e conseqüente. Embora o significado dessas considerações seja definido precariamente, considerações condicionais dessa natureza são normalmente utilizadas pelos seres humanos em suas comunicações habituais.

A relação entre duas variáveis nebulosas x e y é simples na medida em que pode ser caracterizada como um conjunto de considerações condicionais da forma SE A ENTÃO B , onde A e B são etiquetas de conjuntos nebulosos que representam respectivamente os valores de x e y . No caso de relações mais complexas, a caracterização da dependência de y em x pode requerer a utilização de algoritmos nebulosos.

7.1.3 Caracterização de relações complexas por meio de algoritmos nebulosos

Um algoritmo nebuloso, basicamente é uma seqüência ordenada de instruções, tal como em um programa de computador, na qual algumas instruções podem conter classificações de conjuntos nebulosos.

Embora tal caracterização seja imprecisa em natureza, ela pode se adequar perfeitamente à análise de sinais de Eddy-Current. Para tanto, devemos trabalhar nos aspectos básicos das variáveis linguísticas, considerações nebulosas condicionais e algoritmos nebulosos. A base teórica desta técnica é bem precisa e matemática. Portanto, a fonte de imprecisão está na forma como as variáveis linguísticas e os algoritmos nebulosos são aplicados à formulação e à solução de problemas reais (Lee, 1990).

7.1.4 Sumário de propriedades relevantes dos conjuntos nebulosos

A seguir serão apresentadas as principais propriedades dos conjuntos nebulosos, utilizadas neste trabalho (Zadeh, 1973).

7.1.4.1 Notação e terminologia

Um subconjunto nebuloso A de um universo de discurso U é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_A : U \rightarrow [0,1]$, que associa um número escalar $\mu_A(y)$ no intervalo entre 0 e 1, a cada elemento y de U , representando, dessa forma, o grau de associação de y em A , isto é, μ_A .

0 (zero) representa não sociedade, 1 (um) representa completa sociedade e valores entre 0 e 1 representam graus intermediários de sociedade.

O *suporte* de A é o conjunto de pontos em U nos quais $\mu_A(y)$ é positivo.

Um *ponto de cruzamento* em A é um elemento de U cujo μ em A é 0,5.

Um *ponto único nebuloso* é um conjunto nebuloso cujo *suporte* é um ponto simples em U . Se A é um *ponto único nebuloso* cujo *suporte* é o ponto y , podemos escrever:

$$A = \mu / y \quad (7.1)$$

onde μ é o grau de associação de y em A .

Um *ponto único não nebuloso* é representado por $1/y$.

Um conjunto nebuloso A pode ser entendido como a união de seus *pontos únicos nebulosos constituintes*, ou seja:

$$A = \int_U \mu_A(y) / y \quad (7.2)$$

onde a integral é a união de pontos únicos nebulosos $\mu_A(y) / y$.

Se A tem um suporte finito $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, então (7.2) pode ser substituída pela somatória:

$$A = \mu_1 / y_1 + \mu_2 / y_2 + \dots + \mu_n / y_n \quad (7.3)$$

ou

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_i / y_i \quad (7.4)$$

onde μ_i , $i = 1, \dots, n$, é o grau de associação escalar de μ_i em A . O sinal “+” significa união e não soma. Neste sentido de “+”, o universo finito de discurso $U = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ pode ser representado simplesmente pela somatória:

$$U = y_1 + y_2 + \dots + y_n \quad (7.5)$$

ou,

$$U = \sum_{i=1}^n y_i \quad (7.6)$$

Rigorosamente, para *ponto único não nebuloso* deveríamos escrever (7.5) e (7.6) como:

$$U = 1/y_1 + 1/y_2 + \dots + 1/y_n \quad (7.7)$$

e,

$$U = \sum_{i=1}^n 1/y_i \quad (7.8)$$

7.1.4.2 Relações nebulosas

A *relação nebulosa* R de um conjunto X com um conjunto Y é um subconjunto nebuloso do produto cartesiano $X \times Y$ onde $X \times Y$ é a coleção de pares ordenados (x, y) , $x \in X$, $y \in Y$. R é caracterizada por uma função de associação bivariada $\mu_R(x, y)$ e é expressa por:

$$R \triangleq \int_{X \times Y} \mu_R(x, y) / (x, y) \quad (7.9)$$

A relação nebulosa R de X_i conjuntos onde $(i=1, 2, \dots, n)$ é um subconjunto nebuloso do produto cartesiano:

$$X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \quad (7.10)$$

Se R é uma relação de X para Y e S é uma relação de Y para Z , então a *composição* de R e S é uma relação nebulosa denotada por $R \circ S$ e definida por:

$$R \circ S \triangleq \int_{X \times Z} \bigvee_y (\mu_R(x, y) \wedge \mu_S(y, z)) / (x, z) \quad (7.11)$$

onde $\vee$ e $\wedge$ denotam máximo e mínimo.

7.1.4.3 Operações com Conjuntos Nebulosos

• *complemento* de A : $\neg A \triangleq \int_U (1 - \mu_A(y)) / y \quad (7.12)$

Esta operação corresponde à negação. $\neg$ opera no conjunto nebuloso enquanto que *não* opera nas suas etiquetas.

• *união* de A e B : $A + B \triangleq \int_U (\mu_A(y) \vee \mu_B(y)) / y \quad (7.13)$

A união corresponde ao “ou”. Portando, se u e v são etiquetas de conjuntos nebulosos,

$$u \text{ ou } v \triangleq u + v \quad (7.14)$$

• *interseção de A e B*:
$$A \cap B \triangleq \int_U (\mu_A(y) \wedge \mu_B(y)) / y \quad (7.15)$$

A *interseção* corresponde ao “e”. Portanto,

$$u \text{ e } v \triangleq u \cap v \quad (7.16)$$

• *produto de A e B*:
$$AB \triangleq \int_U \mu_A(y) \mu_B(y) / y \quad (7.17)$$

• *intensificação de contraste*: aumenta os valores de $\mu_A(y)$ que são maiores que 0,5 e diminui os que são menores, reduzindo a nebulosidade de A .

$$\text{INT}(A) \triangleq \begin{cases} 2A^2, & \text{para } 0 \leq \mu_A(y) \leq 0,5 \\ -2(\neg A)^2, & \text{para } 0,5 \leq \mu_A(y) \leq 1 \end{cases} \quad (7.18)$$

• *nebulização*: $F(A)$ ou $\tilde{A}$: transforma um conjunto não nebuloso em um conjunto nebuloso ou aumenta a nebulosidade de um conjunto nebuloso. O *nebulizador* F é caracterizado pelo seu *núcleo* $K(y)$, que é o conjunto nebuloso resultante da aplicação de F a um *ponto único nebuloso* $1/y$. Portanto,

$$K(y) \triangleq 1/y \quad (7.19)$$

A aplicação de F a um conjunto nebuloso A é:

$$F(A;K) \triangleq \int_U \mu_A(y) K(y) \quad (7.20)$$

A *nebulização* é muito importante na definição dos limites linguísticos tais como *mais ou menos, um pouco, muito*, etc.

7.1.4.4 Linguagem e Significado

A linguagem L pode ser vista como uma correspondência entre um conjunto de termos T e um universo de discurso U . Esta correspondência pode ser caracterizada por uma relação de nomeação N nebulosa de T para U , que associa com cada termo x em T e cada objeto y em U , o grau de associação $\mu_N(x,y)$ para o qual x se aplica a y .

Para um determinado x , a função de associação $\mu_N(x,y)$ define um subconjunto nebuloso $M(x)$ de U definido como o significado de x , cuja função de associação é:

$$\mu_{M(x)}(y) \triangleq \mu_N(x,y) , \quad x \in T , y \in U \quad (7.21)$$

7.1.4.5 Sistema Especialista Fuzzy

Um Sistema Especialista Fuzzy é um sistema de inteligência artificial criado para resolver problemas de um determinado domínio que normalmente são resolvidos somente por pessoas especialistas.

Um inspetor especialista em Eddy-Current toma decisões utilizando fatos que encontra e hipóteses que formula, buscando em sua memória um conhecimento prévio armazenado durante a sua formação e vida profissionais, ou seja, de acordo com sua experiência no assunto.

Em todo sistema nebuloso é necessário relacionar causa com efeito, ou antecedente com conseqüente, por meio de regras de inferência que reproduzem o mecanismo do aprendizado humano.

O Sistema Especialista Fuzzy durante o seu processo de “raciocínio”, verifica a importância dos dados que encontra, comparando-os com as informações já obtidas em seu conhecimento acumulado.

Neste processo, vai formulando novas hipóteses e verificando novos dados, que influenciaram no processo de raciocínio, sempre baseado no conhecimento acumulado, até chegar a uma decisão. Para isso, utiliza uma coleção de funções de sociedade e regras Fuzzy para argumentar sobre os dados. As regras Fuzzy são escritas na forma condicional SE ENTÃO. O conjunto de regras de um Sistema Especialista Fuzzy é conhecido como a Base de Conhecimento.

Neste trabalho, o processamento de sinais tem como objetivo gerar um conjunto confiável de informações, utilizado para formar a Base de Conhecimento de um sistema Fuzzy de classificação e dimensionamento de defeitos.

A seguir é apresentado o Programa de Processamento de Sinais (PPS) concebido com a finalidade de aprendizagem, ou seja, aquisição de conhecimento sobre a relação entre as características dos sinais e as características dos defeitos.

7.2 Programa de Processamento de Sinais de Eddy-Current.

O Programa de Processamento de Sinais de Eddy-Current (PPS) é composto por 6 módulos. O seu diagrama de blocos é apresentado na Figura 7.1.

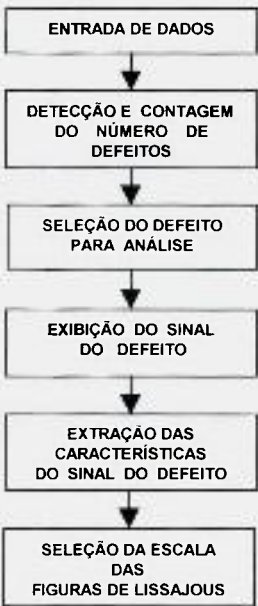


Figura 7.1: Diagrama de blocos do PPS

Ao ser ativado, o PPS fornece o seguinte menu de opções:

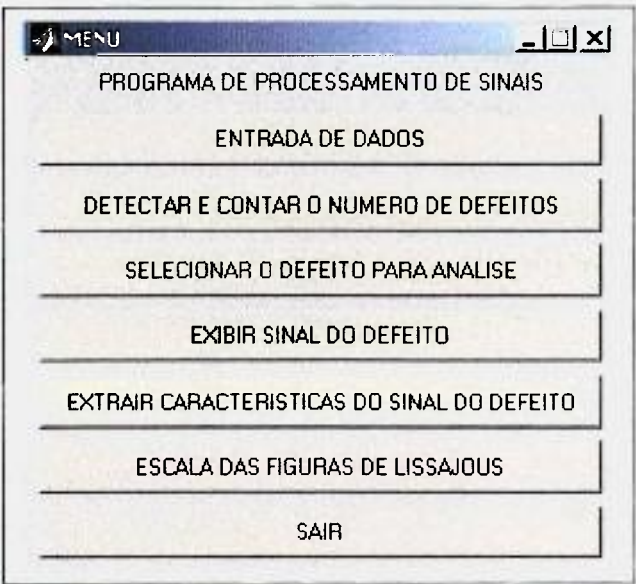


Figura 7.2: Menu principal de opções do PPS

A seguir serão descritos os procedimentos realizados por cada módulo.

7.2.1 Módulo de Entrada de Dados.

Os dados de entrada são lidos pelo Módulo de Entrada de Dados (MED) em 4 arquivos.mat, sendo 2 referentes à resistência e à reatância do sinal original e 2 referentes às mesmas componentes, porém do sinal pré-processado.

Este deve ser o primeiro módulo a ser ativado e abre a seguinte janela:

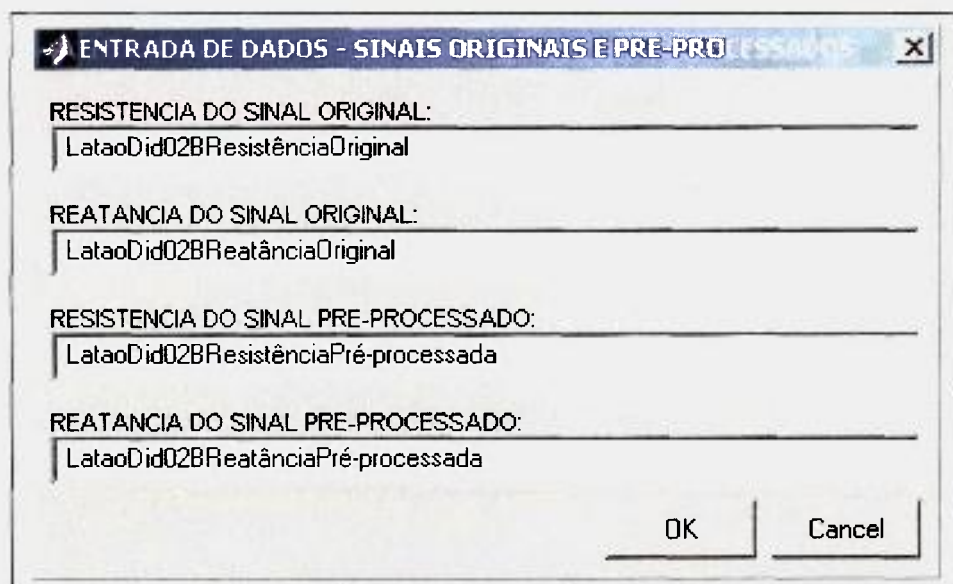


Figura 7.3: Leitura de dados do PPS

Na Figura 7.3 os arquivos.mat LataoDid02BResistência e Reatância, Original e Pré-processada, foram digitados e, ao clicar em “OK”, foram carregados pelo PPS que verifica a sua existência, extensão e dimensão. Caso algum dado de entrada não esteja conforme, o programa emite uma mensagem de erro.

7.2.2 Módulo de Detecção e Contagem de Defeitos (MDC).

A detecção e contagem de defeitos é baseada na forma de trabalho dos inspetores do END por Eddy-Current.

Os inspetores que utilizam a técnica de inspeção por meio de correntes parasitas, normalmente determinam a existência de um defeito pela observação de alterações nos valores da tensão da reatância capacitiva e da resistência do seu sinal, bem como pela formação da figura de Lissajous.

Através da observação da Figura 7.4, tal como procede um inspetor, é possível determinar a existência dos 8 defeitos artificiais do tubo LataoASME01.

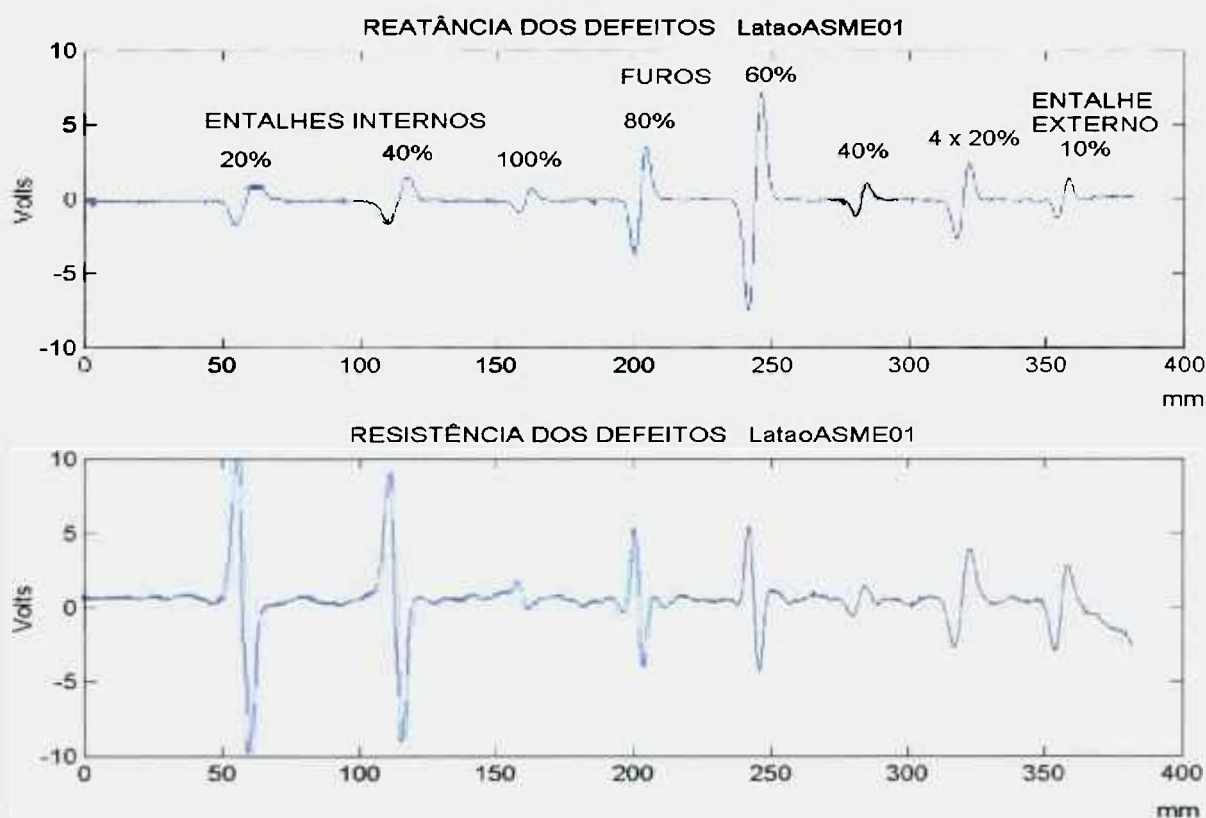


Figura 7.4: Resistência e reatância dos defeitos do tubo LataoASME01

No entanto, nem sempre o comportamento da componente da resistência permite a detecção de defeitos, pois essa componente é fortemente afetada pelo ruído do sinal referente ao material.

Na Figura 7.5 observa-se que é praticamente impossível detectar defeitos por meio da análise do sinal da resistência do tubo InoxDid02, enquanto que o sinal da reatância revela a existência de 2 defeitos bem evidentes.

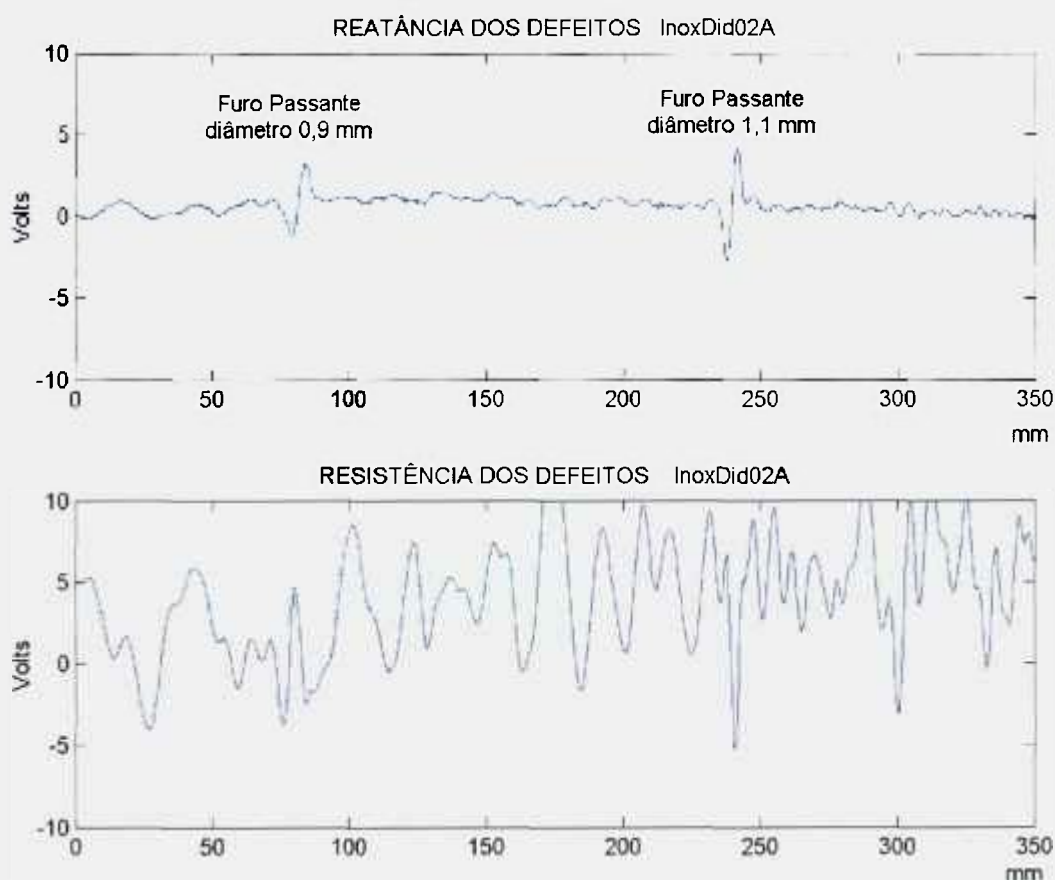


Figura 7.5: Detecção de defeitos (Reatância x Resistência)

Neste caso, a postura de um inspetor é analisar apenas a componente da reatância do sinal. Portanto, considerando que a reatância é a componente que melhor evidencia a existência de um sinal, optou-se neste trabalho por detectar defeitos somente pela verificação das alterações na componente pré-processada da reatância, à semelhança da forma de trabalho de um inspetor. O Módulo de Detecção e Contagem de Defeitos busca valores absolutos de tensão maiores que os limites de corte (“thresholding”) estabelecidos pela amplitude máxima em Volts do ruído remanescente após o pré-processamento.

Para tanto, a componente da reatância deve ser pré-processada para que o sinal apresente um valor médio próximo a zero com conseqüente redução dos limites de corte.

A Figura 7.6 ilustra este procedimento onde o sinal da reatância do tubo InoXDid02 foi pré-processado com a Transformada Wavelet Biorthogonal 3.5 com a retirada dos detalhes D1, D2, D3, D4 e D9 e da aproximação A9. Os limites de corte de

tensão que eram inicialmente de $-0,3$ Volts a $+1,5$ Volts passaram a ser de $-0,6$ Volts a $+0,6$ Volts, com uma redução da variação de $1,8$ Volts para $1,2$ Volts.

Este pré-processamento é importante pois permite a detecção de defeitos cuja amplitude da reatância é maior que uma faixa menor de corte, ou seja, permite a detecção de um número maior de defeitos.

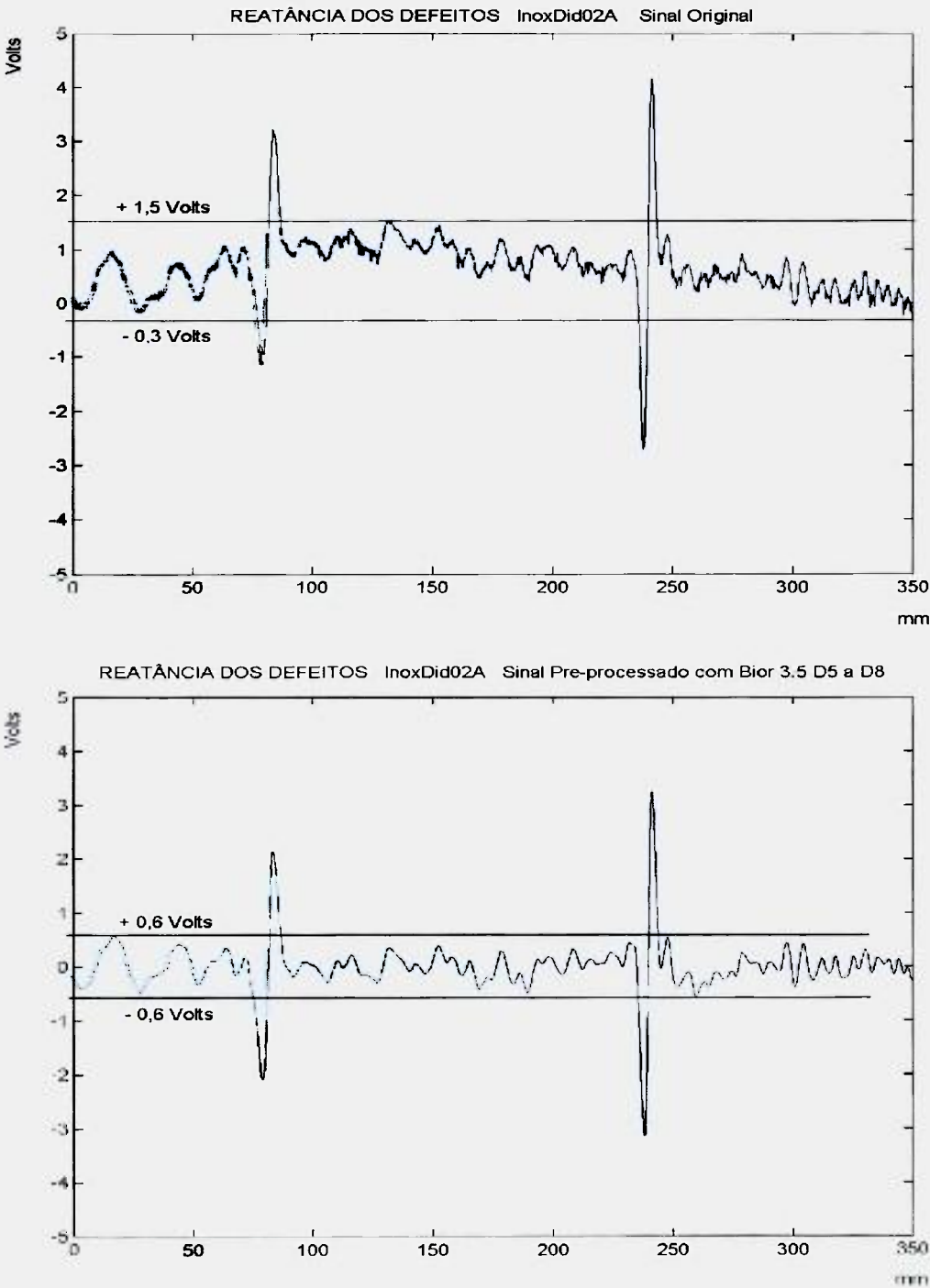


Figura 7.6: Redução dos limites de corte pelo pré-processamento

A detecção de um defeito é feita pelo MDC verificando todos os valores da reatância a partir do início do arquivo de sinais que são maiores ou menores que os limites de corte. Se um valor verificado é menor que o limite inferior de corte, significa que foi detectada a Perna P1 (Pétala 1) da figura de Lissajous correspondente, ou seja, o início do defeito abaixo do limite de corte inferior, conforme ilustrado na Figura 7.7.

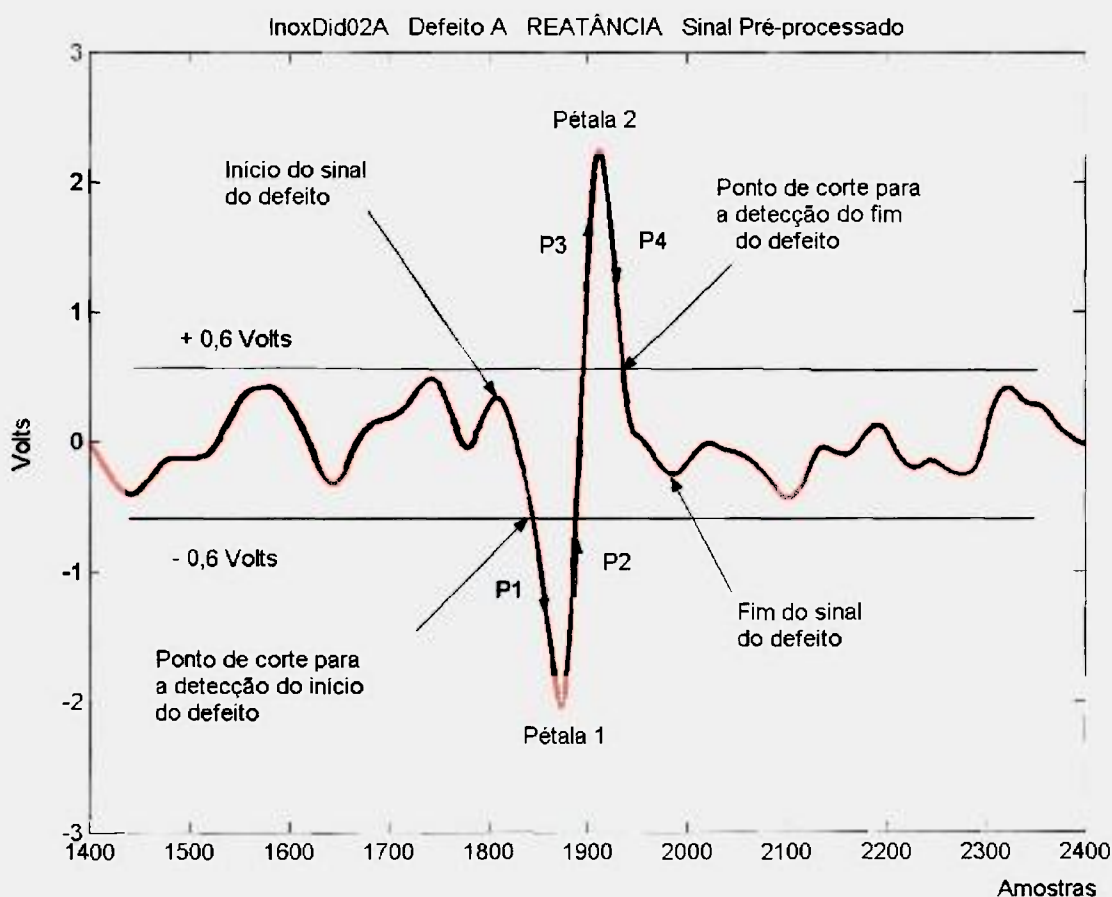


Figura 7.7: Detecção de defeitos

A seguir, o MDC verifica se ocorre uma mudança de negativo para positivo na derivada do sinal da reatância em relação ao comprimento do tubo, ou seja, identifica as pernas P2 (Pétala1) e P3 (Pétala2). Verifica em seguida se ocorre outra mudança do sinal da derivada do sinal da reatância em relação ao comprimento do tubo, desta vez de positivo para negativo. Após essa checagem, o MDC conclui que foi detectada a perna P4 (Pétala 2) e avança no comprimento do tubo até que o valor da reatância seja igual ao limite superior de corte.

Devido aos limites de corte, a figura de Lissajous ficaria incompleta pois o sinal do defeito propriamente dito não começa no limite inferior de corte mas antes e também não termina no limite superior de corte mas depois, conforme ilustrado na Figura 7.8.

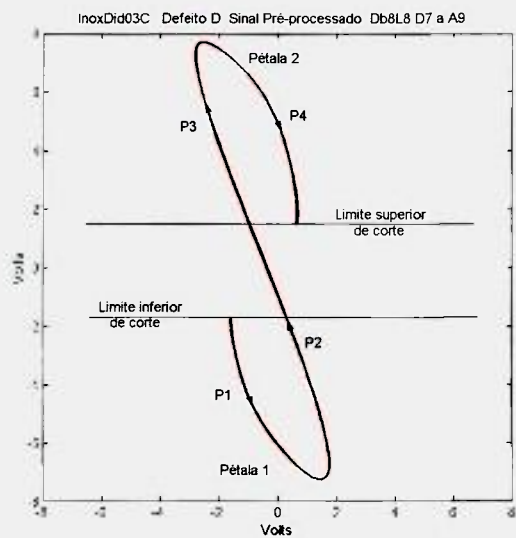


Figura 7.8: Figura de Lissajous incompleta do defeito

Para contornar este inconveniente, o MDC verifica valores de reatância anteriores ao início detectado do defeito e posteriores ao fim detectado do defeito até que as derivadas mudem de sinal, registra o início e o fim completo do defeito e fecha a figura de Lissajous. A Figura 7.9 ilustra o resultado deste procedimento.

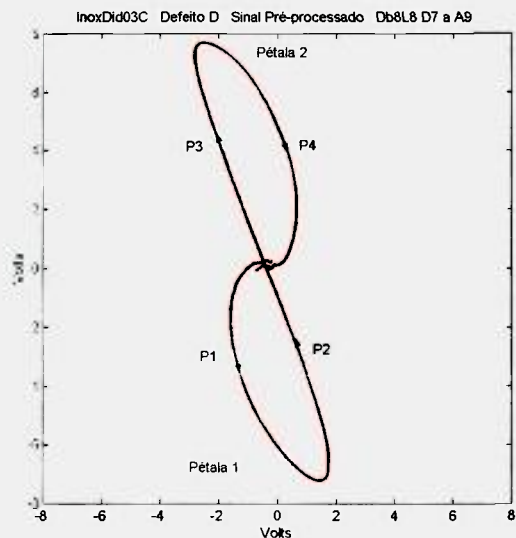


Figura 7.9: Figura de Lissajous completa do defeito

A contagem do número de defeitos detectados é feita pela totalização do número de ciclos de detecção realizados. O MDC exibe a janela apresentada na Figura 7.10 com o número de defeitos detectados.

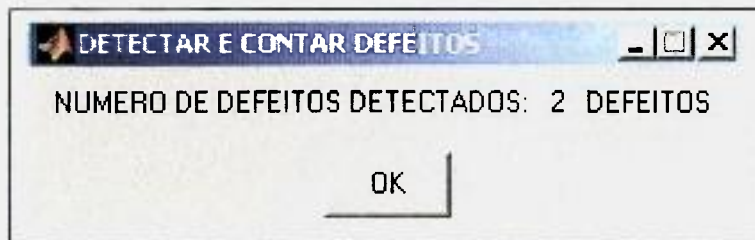


Figura 7.10: Apresentação do número de defeitos detectados

7.2.3 Módulo de Seleção do Defeito para Análise (MSA).

Após a detecção e a contagem do número de defeitos, seleciona-se um defeito para a aquisição das características do sinal ativando a opção "SELECIONAR O DEFEITO PARA ANÁLISE" do menu principal. O MSA exibe a seguinte janela:

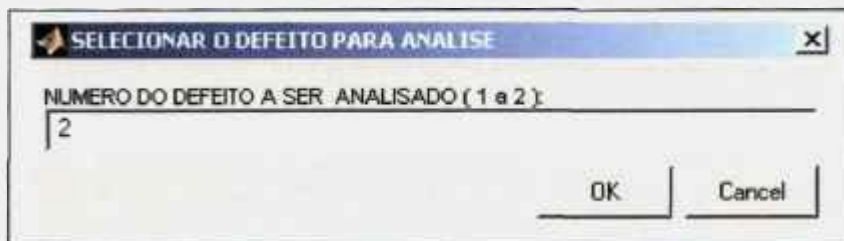


Figura 7.11: Seleção do defeito para análise

7.2.4 Módulo de Exibição de Sinais (MEX).

Uma vez selecionado um defeito, ao ativar a opção "EXIBIR SINAL DO DEFEITO" no menu principal, as componentes da resistência e da reatância do sinal original e do sinal pré-processado são exibidas com a localização do defeito a partir do início do tubo, bem como as correspondentes figuras de Lissajous, conforme apresentado na Figura 7.12.

A localização x_i (mm) de um defeito i é determinada pela seguinte relação:

$$x_i = \frac{a_i \times L_{\text{tubo}}}{a_{\text{total}}} \tag{7.22}$$

onde, a_i : número da amostra no arquivo de sinais
 L_{tubo} : comprimento do tubo inspecionado em mm
 a_{total} : número total de amostras do arquivo de sinais

Não é possível determinar o início de um defeito pela posição do início do sinal no comprimento do tubo, pois antes de chegar ao defeito já começa a haver interação entre o campo magnético das bobinas e o defeito. A localização do defeito é feita pelo ponto central da componente do sinal da reatância.

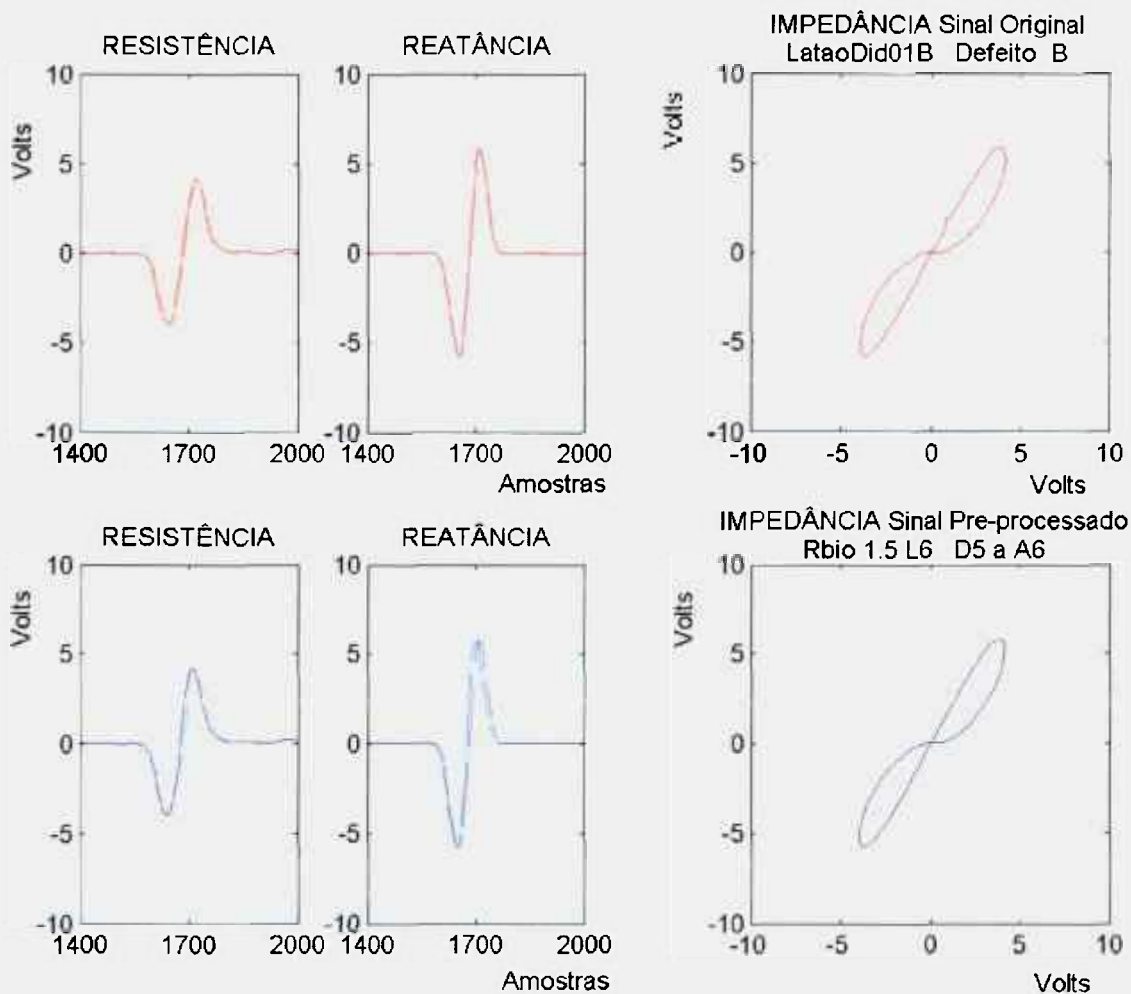


Figura 7.12: Sinal original e sinal pré-processado do defeito selecionado

7.2.5 Módulo de Extração de Características do Sinal (MAC).

Este módulo, ativado pela opção "EXTRAIR CARACTERÍSTICAS DO SINAL", analisa a figura de Lissajous do defeito selecionado pelo MSA visando a aquisição do ângulo de fase e da amplitude total do sinal, que são as características normalmente lidas pelos inspetores de Eddy-Current, conforme apresentado na Figura 7.13.

Neste trabalho, além das características tradicionais utilizadas pelos inspetores para dimensionar defeitos, é proposta a aquisição de novas características do sinal, relacionadas com as dimensões das pétalas e com a gênese (trajetória ou formação) da sua figura de Lissajous, conforme ilustra a Figura 7.14. As novas características observadas auxiliam no processo de dimensionamento de defeitos.

As dimensões das pétalas, utilizadas neste trabalho, são a Amplitude Parcial (A_p) ou seja, a sua parcela da amplitude total e a Abertura (A_b) que é a dimensão perpendicular à direção de A_p . As dimensões são medidas em Volts no plano da impedância.

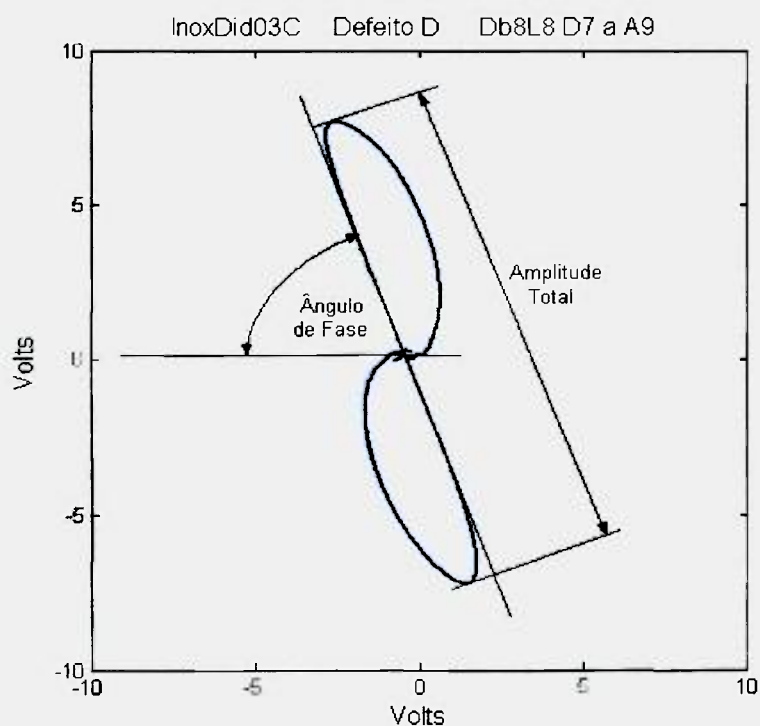


Figura 7.13: Leitura do ângulo de fase e da amplitude total do sinal

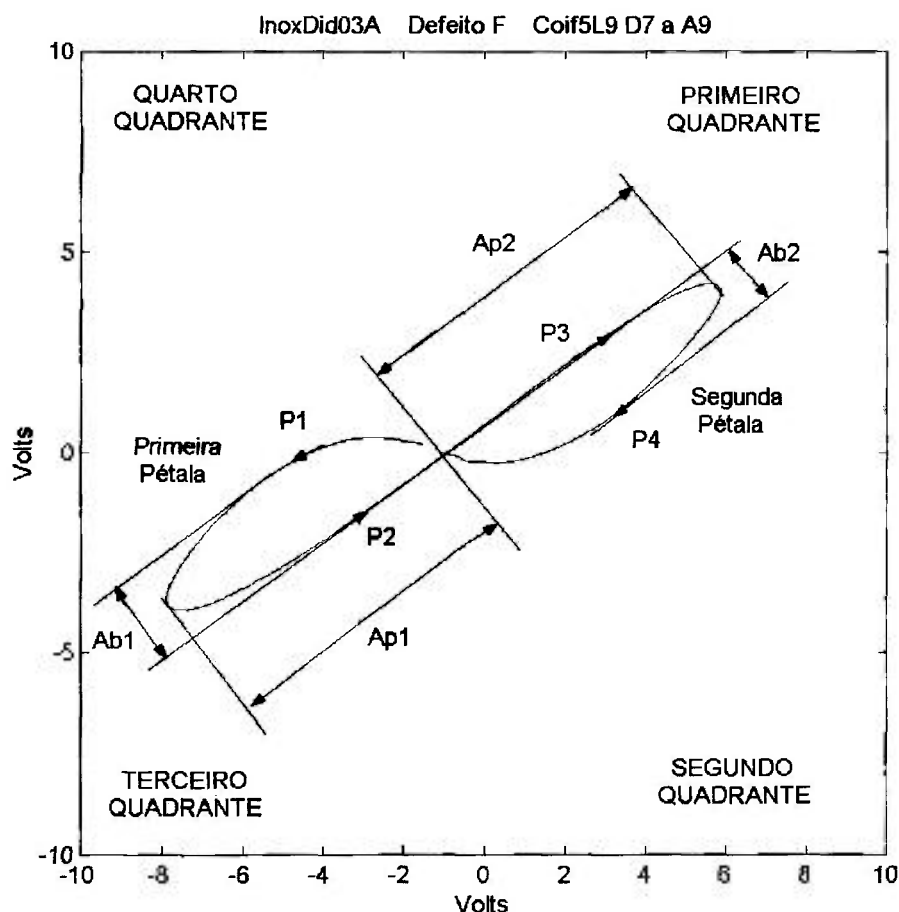


Figura 7.14: Novas características dos sinais de Eddy-Current

A gênese do sinal é a seqüência das 4 fases ou 4 pernas de formação da figura de Lissajous, ou seja, a evolução do sinal nos quadrantes do plano da impedância. Uma gênese correta corresponde à formação da Perna P1 no 2º ou no 3º Quadrante. O MAC adquire as características dos sinais conforme apresentado a seguir.

7.2.5.1 Leitura do ângulo de fase

A leitura do ângulo de fase é realizada da forma consagrada nas inspeções por Eddy-Current, ou seja, quando existe uma reta comum para as pernas P2 e P3, o ângulo de fase é medido entre essa reta e a horizontal, conforme apresentado na Figura 7.13. Quando essa reta não existe, ou quando existe mais de uma reta para uma mesma figura

de Lissajous, o ângulo de fase é medido entre a reta que une as extremidades das pétalas e a horizontal conforme apresentado na Figura 7.15.

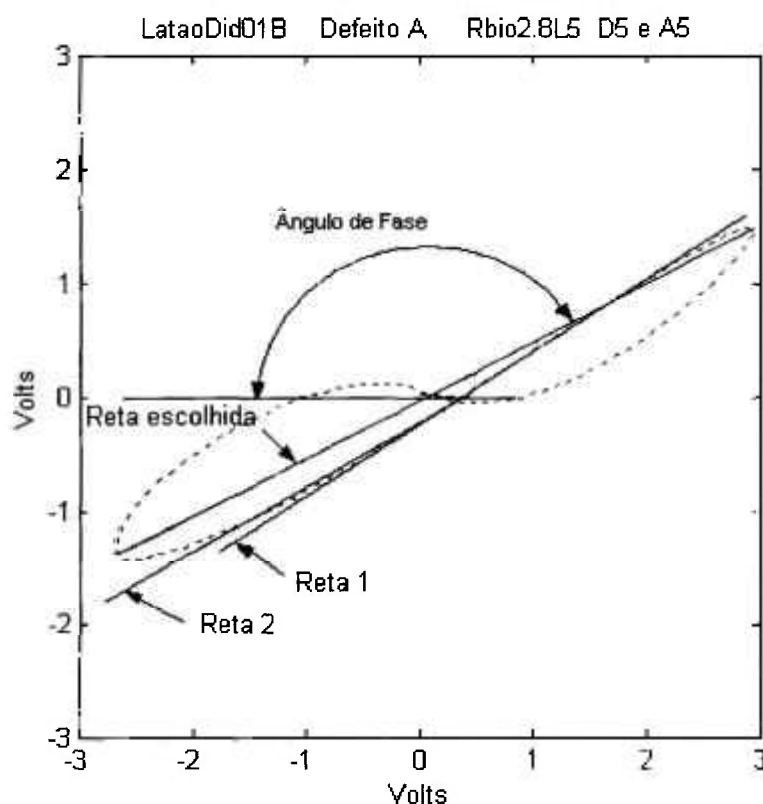


Figura 7.15: Leitura do ângulo de fase pelas extremidades da figura de Lissajous

Na prática das inspeções por Eddy-Current, a subjetividade da metodologia seguida pelos inspetores resulta na possibilidade de leitura de ângulos de fase diferentes para uma mesma figura, como pode ser observado na Figura 7.15. O problema se agrava com o aumento da relação entre a Abertura e a Amplitude Parcial do sinal.

Neste trabalho, apresenta-se uma forma sistemática de abordar essa questão, sem a análise da forma mais apropriada de leitura do ângulo de fase, que é proposta como um trabalho futuro.

Quando existe reta, a declividade m da reta comum às pernas P2 e P3 é calculada por:

$$m = \frac{X_{Li} - X_{Lj}}{R_i - R_j} \quad (7.23)$$

onde i e j são as coordenadas de dois pontos da reta no plano da impedância.

Para determinar a existência da reta, primeiramente o MAC determina o centro da figura de Lissajous que é a célula do plano da impedância que apresenta a maior densidade de pontos de coordenadas R , X_L .

Em seguida, são localizadas as extremidades das pétalas calculando para cada ponto da figura de Lissajous a distância entre o ponto considerado e o centro da figura. Os pontos mais distantes correspondem às extremidades das pétalas (Figura 7.16).

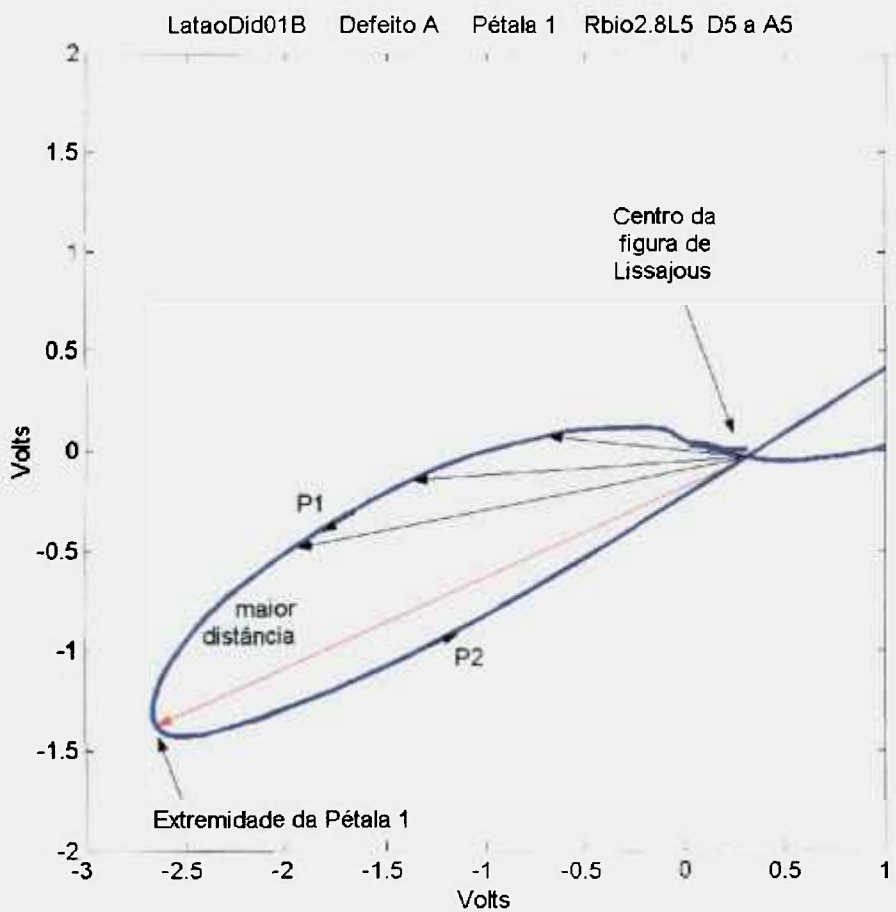


Figura 7.16: Localização da extremidade da pétala

A distância entre as duas extremidades é calculada e dividida em n trechos.

Cada trecho tem a sua declividade m_i ($i = 1$ a n) calculada. As declividades são comparadas buscando semelhança entre elas. Caso seja identificada semelhança em is trechos para $is \geq n/2$, é considerado que existe reta e a declividade m da reta é dada por:

$$m = \frac{\sum m_{is}}{is} \tag{7.24}$$

A Figura 7.17 apresenta o diagrama de blocos do procedimento de leitura do ângulo de fase.

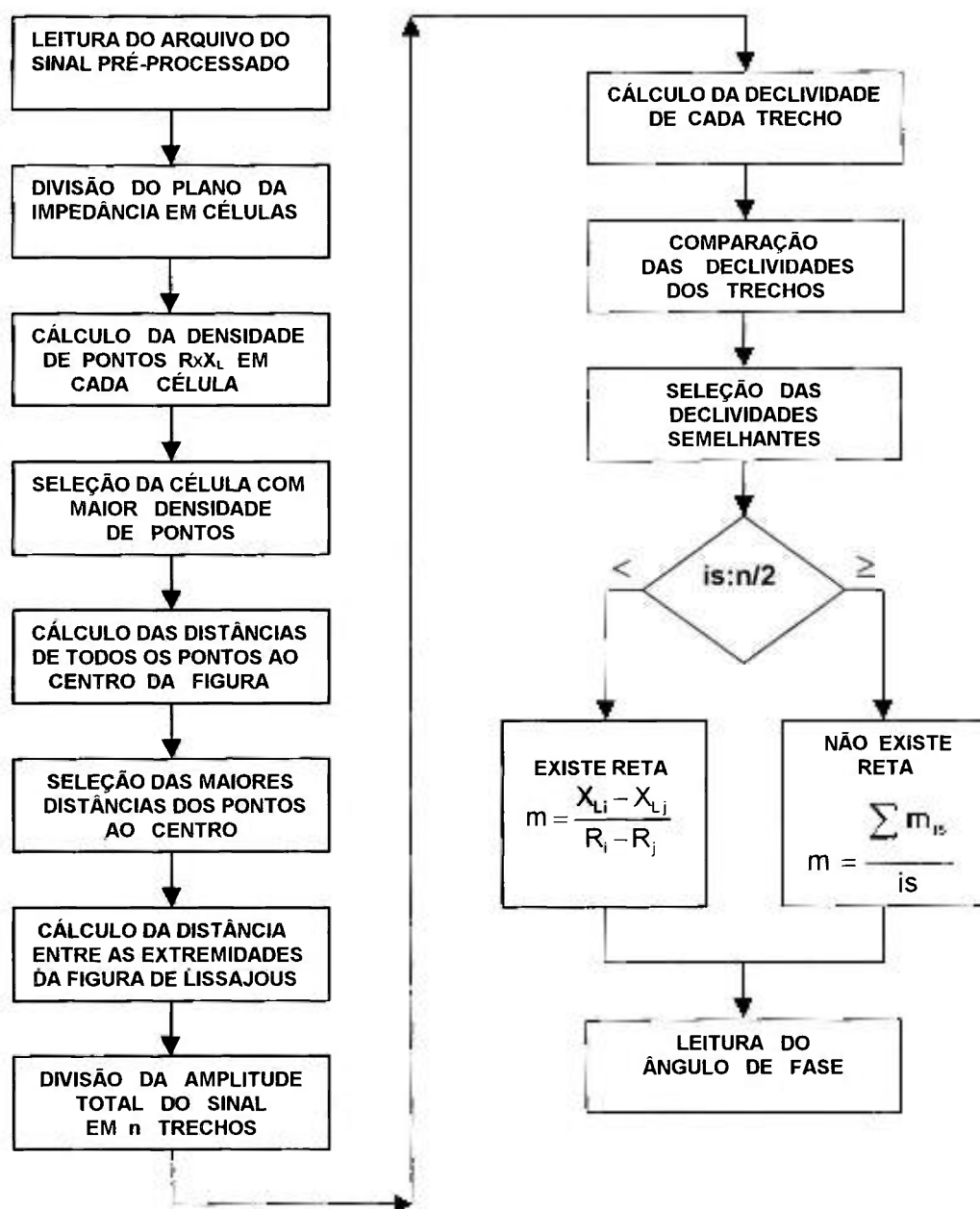


Figura 7.17: Diagrama de blocos do procedimento de leitura do ângulo de fase

7.2.5.2 Leitura das Amplitudes Parciais Ap1 e Ap2

A metodologia para a determinação de Ap1 e Ap2 depende da existência ou não da reta comum às pernas P2 e P3.

Se essa reta existir, são calculadas retas perpendiculares a ela até as extremidades da figura de Lissajous, conforme mostra a Figura 7.18.

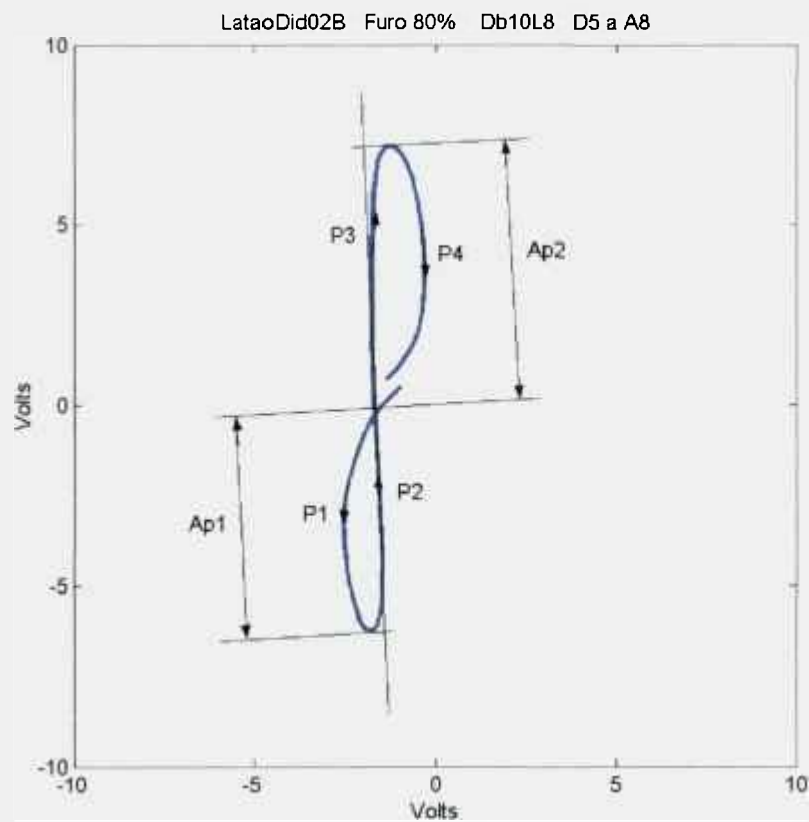


Figura 7.18: Leitura das Amplitudes Parciais quando existe reta P2 – P3

As distâncias entre as retas perpendiculares à reta P2 – P3 nas extremidades e o centro da figura de Lissajous correspondem às Amplitudes Parciais Ap1 e Ap2.

Se essa reta não existir, as Amplitudes Parciais são determinadas entre as extremidades das Pétalas 1 e 2 e o centro da figura de Lissajous, conforme apresentado na Figura 7.19.

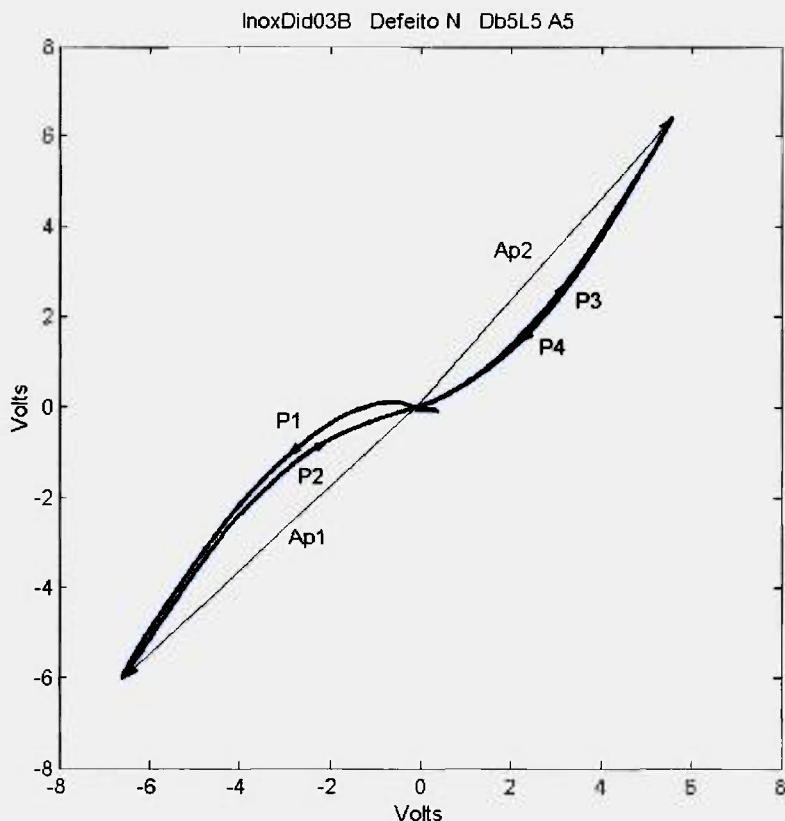


Figura 7.19: Leitura das Amplitudes Parciais quando não existe reta P2 – P3

7.2.5.3 Leitura das Aberturas Ab1 e Ab2

A forma de determinar as Aberturas Ab1 e Ab2 também depende da existência de uma reta única para as Pernas P2 e P3.

Se essa reta existe, são calculadas retas paralelas a ela por todos os pontos do sinal, conforme apresentado na Figura 7.20. A maior distância entre uma reta paralela à reta P2 - P3 e que tangencia a Perna P1, corresponde à Abertura 1 da figura de Lissajous. A maior distância entre uma reta paralela à reta P2 - P3 e que tangencia a Perna P4, corresponde à Abertura 2 da figura de Lissajous.

Se essa reta não existe, são calculadas retas paralelas à reta da Amplitude Parcial. A maior distância entre retas paralelas corresponde à Abertura do sinal (Figura 7.21).

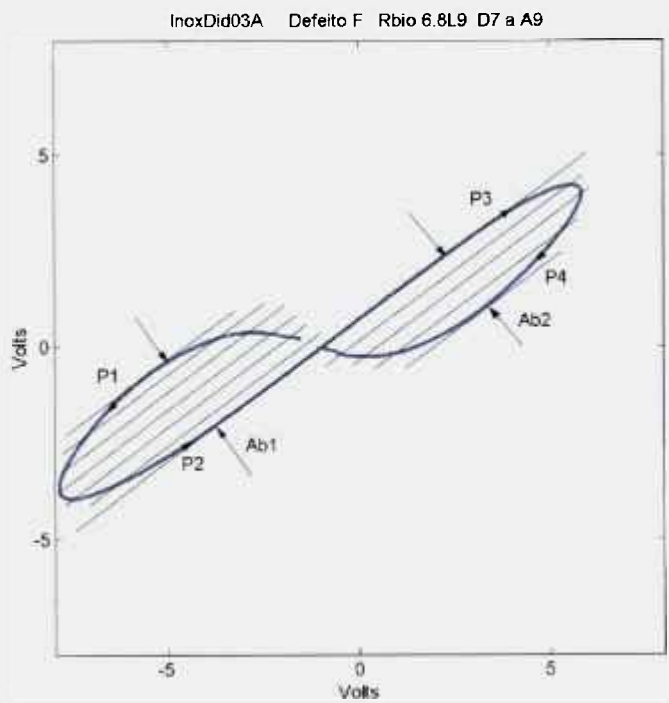


Figura 7.20: Leitura das Aberturas quando existe reta P2 – P3

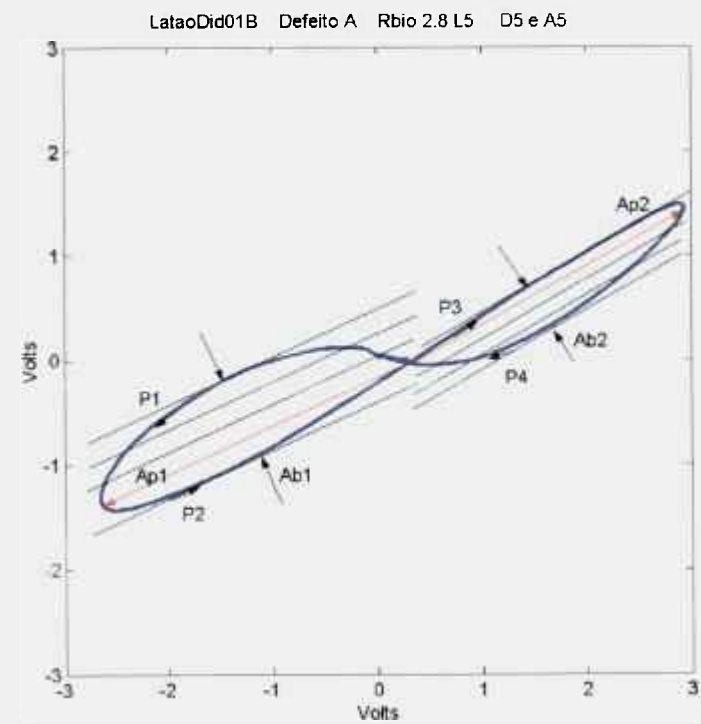


Figura 7.21: Leitura das Aberturas quando não existe reta P2 – P3

7.2.5.4 Leitura da Trajetória do Sinal

A leitura da formação ou gênese da figura de Lissajous é realizada pela verificação do Quadrante de início da Perna P1, que deve ser o Quadrante 2 ou o Quadrante 3, conforme apresentado na Figura 7.22.

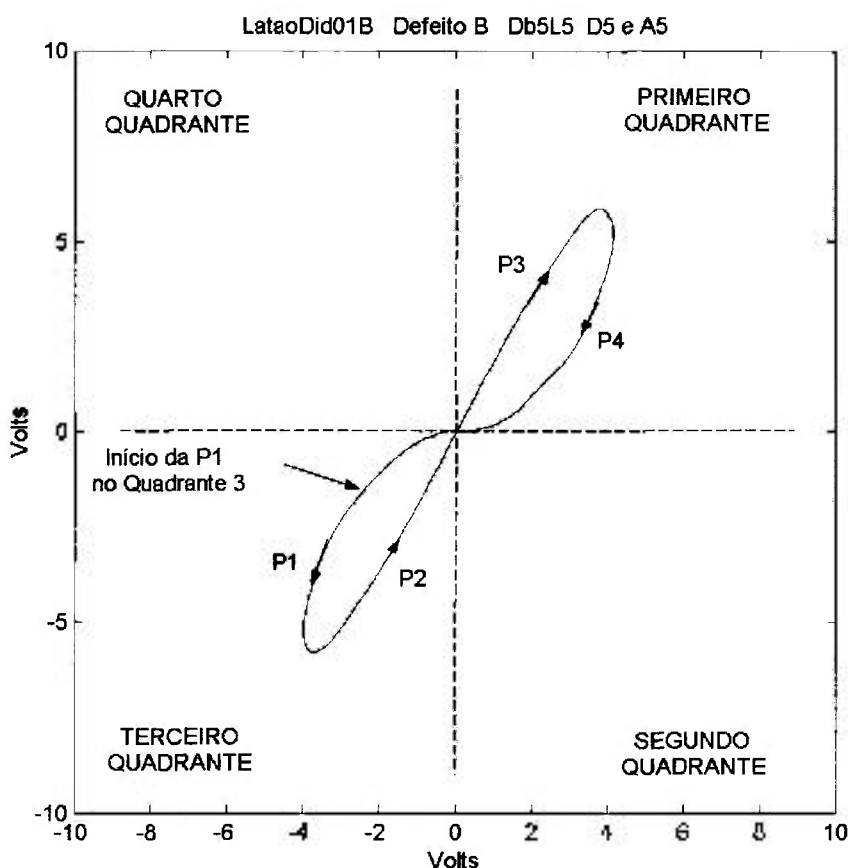


Figura 7.22: Trajetória normal do sinal

Caso o início do sinal se dê por um desses quadrantes, o MAC emite uma mensagem dando conta que a gênese do sinal é normal e informa o quadrante de início.

Caso a Perna P1 inicie nos Quadrantes 1 ou 4, conforme apresenta a Figura 7.23, o MAC informa que foi detectada uma anomalia na gênese do sinal, informa o quadrante de início do sinal e interrompe o processamento.

Uma anomalia na formação do sinal pode ser consequência de falhas na aquisição do sinal, tais como configuração incorreta do programa de aquisição ou cabos invertidos.

Uma formação anômala do sinal também pode revelar a existência de defeitos internos no material tais como porosidades, inclusões ou falhas na laminação.

Em qualquer caso, a mensagem de anomalia na formação do sinal é um evento raro mas importante que exige uma análise específica.

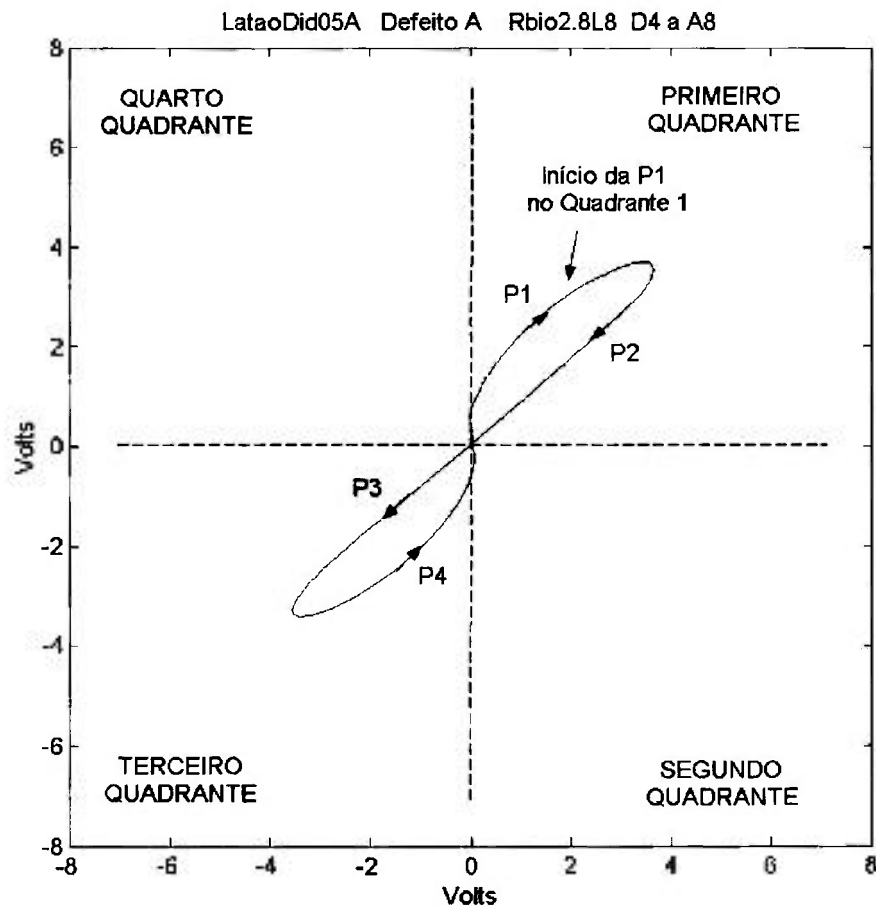


Figura 7.23: Gênese anômala do sinal

Alguns sinais que possuem um ângulo de fase maior que 90° e uma grande Abertura 1, como o sinal da Figura 7.24, iniciam a Perna 1 no Quadrante 4, o que poderia ser considerado pelo MAC como uma gênese anômala do sinal no Quadrante 4. No entanto, como esses sinais evoluem corretamente para o Quadrante 3, o MAC emite a mensagem de gênese normal do sinal.

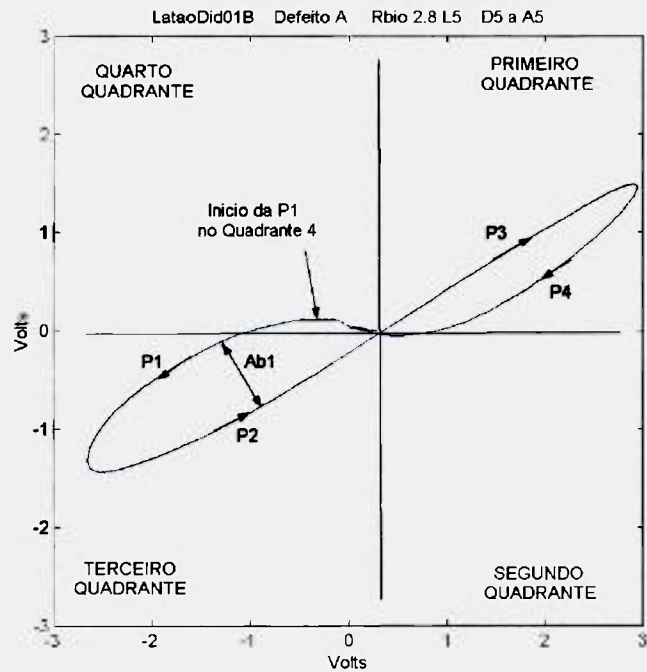


Figura 7.24: Gênese normal do sinal (início da Perna1 no Quadrante 4)

Na Figura 7.25 é apresentada a janela exibida pelo PPS com todos os resultados do processamento do sinal.

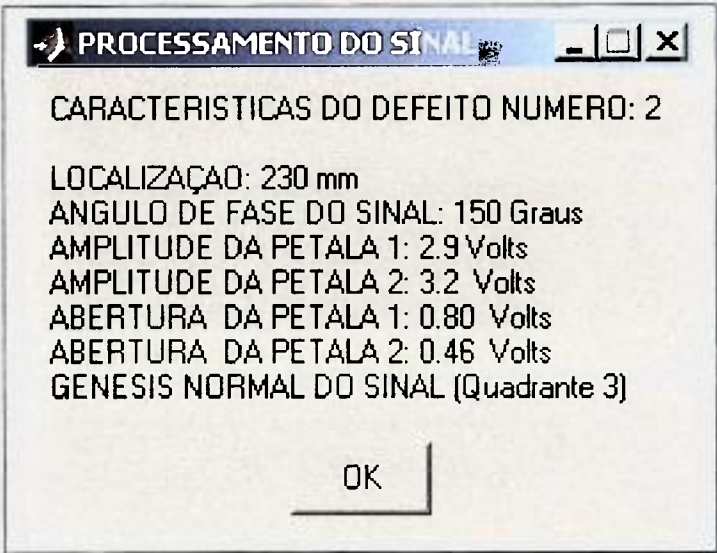


Figura 7.25: Características do defeito

7.2.6 Módulo de Seleção da Escala da Figura de Lissajous (MSE)

O MSE, cuja janela é apresentada na Figura 7.26, permite alterar a escala das figuras de Lissajous geradas pelo MEX (Figura 7.12), para melhor visualização.

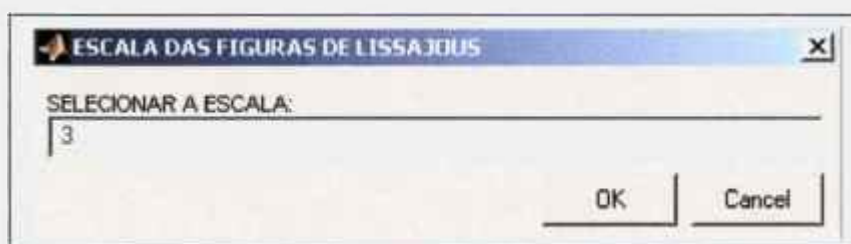


Figura 7.26: Seleção da escala da figura de Lissajous

7.3 Base de Conhecimento do Sistema Especialista Fuzzy

Os arquivos de sinais de Eddy-Current listados no Capítulo 5 foram processados através do programa PPS descrito no item anterior.

As características extraídas dos sinais foram relacionadas com os defeitos para a geração do conjunto de regras que formam a Base de Conhecimento do Sistema Especialista Fuzzy.

A base experimental foi obtida por meio de inspeções realizadas em tubos com defeitos artificiais, cuja produção foi baseada nos defeitos reais normalmente encontrados em tubos de Geradores de Vapor e nos defeitos padronizados estabelecidos pelo Código ASME.

A seguir são apresentadas as análises dos sinais para cada tipo de defeito com a determinação da relação entre as características extraídas dos sinais e a forma/dimensões dos defeitos.

7.3.1 Defeitos Circunferenciais

Os defeitos circunferenciais podem ser internos ou externos, simétricos ou assimétricos, concêntricos ou excêntricos e localizados ou extensos.

Os defeitos circunferenciais simétricos são aqueles que possuem uma seção circunferencial simétrica e constante ao longo do perímetro do tubo. Os defeitos circunferenciais assimétricos possuem uma seção circunferencial assimétrica. A Figura 7.27 apresenta esses dois tipos de defeitos.



Figura 7.27: Defeitos circunferenciais simétricos (a) e assimétricos (b)

Esses defeitos reduzem por igual a espessura da parede do tubo e podem ser internos ou externos.

Os defeitos circunferenciais excêntricos possuem uma seção transversal de dimensão variável ao longo do perímetro do tubo, ou seja, este tipo de defeito é mais profundo de um lado do tubo do que do outro, conforme apresentado na Figura 7.28.



Figura 7.28: Defeitos circunferenciais concêntricos (a) e excêntricos (b)

Os defeitos circunferenciais podem ser localizados ou extensos, ou seja, podem ter uma pequena ou uma grande extensão longitudinal no tubo. Se forem internos ao tubo, os defeitos circunferenciais normalmente surgem na região do mandrilamento do tubo (região do espelho), são gerados por erosão e geralmente são de grande extensão. Se forem externos, surgem na região da placa suporte do tubo ou no espelho, são gerados por corrosão localizada provocada por lama depositada nessas regiões e podem ser de pequena ou de grande extensão.

Os defeitos circunferenciais também podem ser causados por desgaste entre tubo e placa suporte devido à vibração do tubo (Silveira, 2002). Neste caso, a extensão do defeito é da dimensão da espessura da placa suporte e geralmente o defeito é simétrico. Pode ser concêntrico, caso a espessura da parede seja reduzida por igual no perímetro do tubo, ou excêntrico, caso o tubo seja forçado mais de um lado do que do outro na chapa suporte, provocando o seu desgaste desigual.

Não é possível distinguir o sinal de um defeito circunferencial concêntrico de um excêntrico por meio de sondas com bobinas circunferenciais, pois o sinal resultante é uma média do defeito ao longo do seu perímetro. Somente sondas dotadas de múltiplas bobinas radiais ou sondas rotativas podem fazer esse tipo de detecção (Joubert et al., 2002).

Para simular artificialmente os defeitos circunferenciais, foram produzidos entalhes circunferenciais internos ou externos, simétricos ou assimétricos e de pequena ou de grande extensão nos tubos de laboratório LataoDid01 (todos os defeitos), LataoDid04 (defeitos D e E) e InoxDid01 (reduções de diâmetro). Nos tubos LataoASME01, 02, 03 e 04, InoxASME03 e InoxDid03, os entalhes circunferenciais também foram utilizados para calibração. Os resultados das análises são apresentados a seguir para alguns casos típicos.

7.3.1.1 Entalhe circunferencial externo, simétrico e concêntrico

O defeito C do tubo LataoDid01 é um entalhe circunferencial externo, simétrico e concêntrico em forma de “v” com abertura de 60°, largura de 1,2 mm e fundo arredondado de raio 0,2 mm. A sua profundidade é de 0,5 mm, o que corresponde a 30% da espessura da parede do tubo.

O pré-processamento do arquivo LataoDid01B foi realizado pela Transformada de Wavelet Dmey (Discrete Approximation or Meyer Wavelet) em 7 níveis com a exclusão das componentes de alta frequência do sinal D1 a D3 e com a manutenção das componentes de baixa e de média frequências D4 a D7 bem como da aproximação A7.

O defeito C é o defeito número 3 do tubo LataoDid01 selecionado pela opção “SELECIONAR O DEFEITO PARA ANÁLISE” do menu principal do PPS.

A Figura 7.29 apresenta o sinal exibido pelo PPS na opção “EXIBIR SINAL DO DEFEITO”, um esquema da passagem da sonda pelo defeito e o processamento do sinal gerado pela opção “EXTRAIR CARACTERÍSTICAS DO SINAL”.

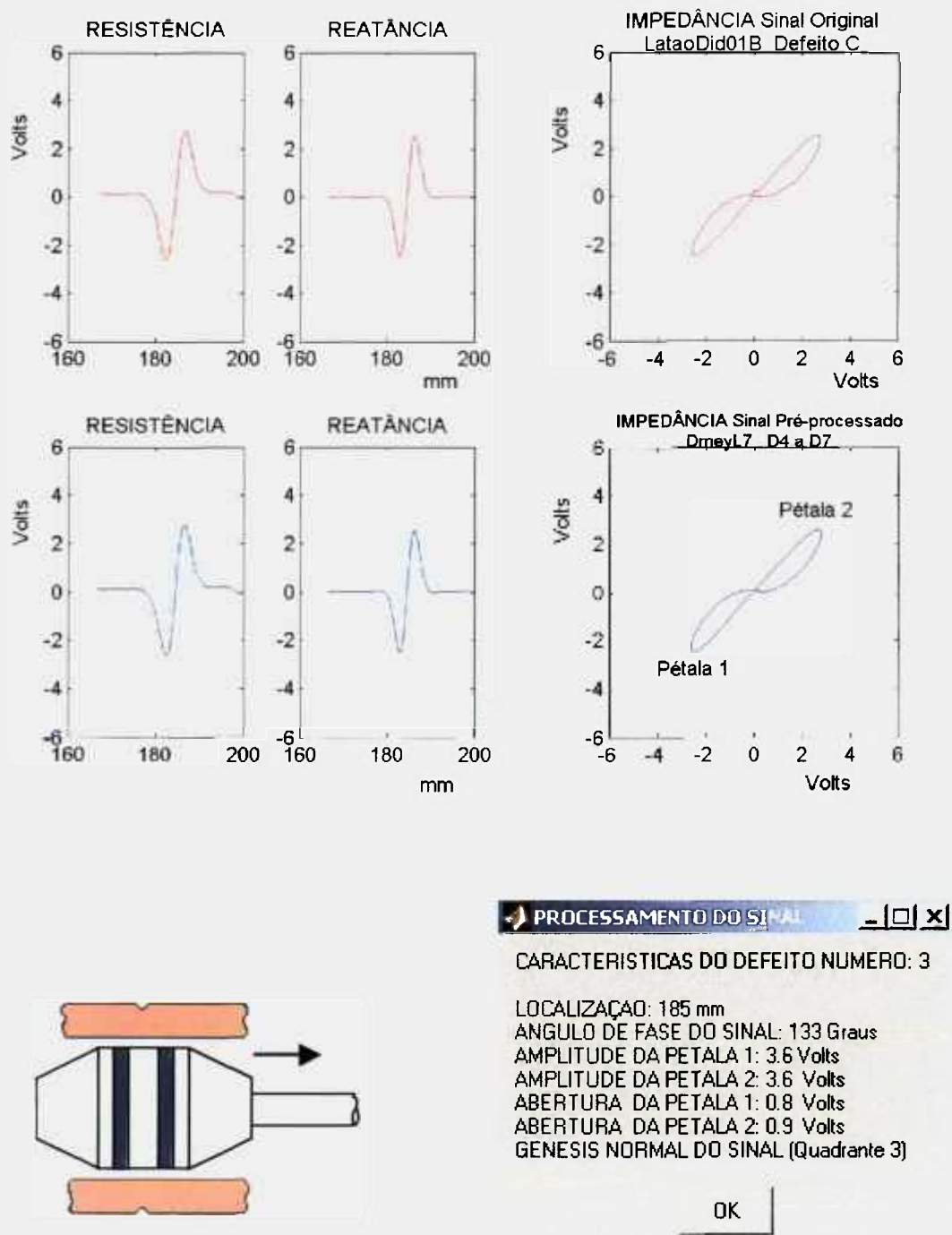


Figura 7.29: Processamento do sinal do defeito C do tubo LataoDid01

Dos resultados apresentados, observa-se que:

- a) o ângulo de fase é 133° ;
- b) as amplitudes $Ap1$ e $Ap2$ têm valores próximos;
- c) as aberturas $Ab1$ e $Ab2$ têm valores próximos; e,
- d) a gênese do sinal é normal no Quadrante 3.

A figura de Lissajous desse sinal é visualmente simétrica, o que pode ser comprovado pelos valores semelhantes das Aberturas 1 e 2 e das Amplitudes 1 e 2 do sinal.

Da análise deste processamento obtém-se que o ângulo de fase é 133° , o defeito é externo e a profundidade é 30%. Observa-se também que o defeito é simétrico e o sinal é simétrico, onde simétrico significa $Ab1 \sim Ab2$ e $Ap1 \sim Ap2$.

Na Figura 7.30 é apresentado o processamento de um outro defeito simétrico e concêntrico do mesmo tubo, ou seja, o defeito número 2 ou defeito B, que é um entalhe circunferencial externo em forma de “v” com abertura de 90° , largura máxima de 1,6 mm e profundidade de 0,7 mm (47% da espessura do tubo).

O sinal original foi pré-processado com a Transformada de Wavelet Biorthogonal Reversa 1.5 em 6 níveis com a exclusão das componentes do sinal de alta e de média frequências D1 a D4 e com a manutenção da componente de baixa frequência D5 bem como da aproximação A6.

Da Figura 7.30 observa-se que:

- a) o ângulo de fase é 120° ;
- b) as amplitudes $Ap1$ e $Ap2$ têm valores próximos;
- c) as aberturas $Ab1$ e $Ab2$ têm valores próximos; e,
- d) a gênese do sinal é normal no Quadrante 3.

A figura de Lissajous do defeito B também é visualmente simétrica e os valores das Amplitudes 1 e 2 bem como das Aberturas 1 e 2 são semelhantes.

O processamento de outros dois defeitos simétricos do tubo LataoDid01 (defeitos E e F), apresentado na Figura 7.31, leva à mesma conclusão quanto à relação entre as Aberturas e a simetria do defeito, isto é, defeitos simétricos apresentam figuras de Lissajous simétricas.

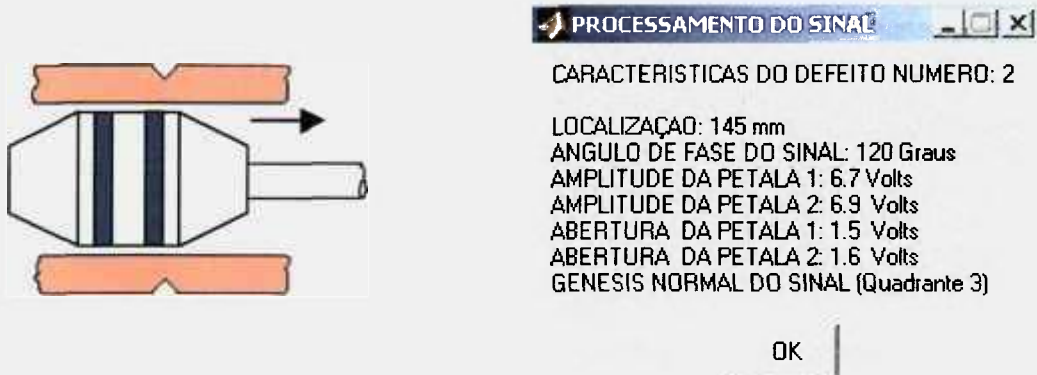
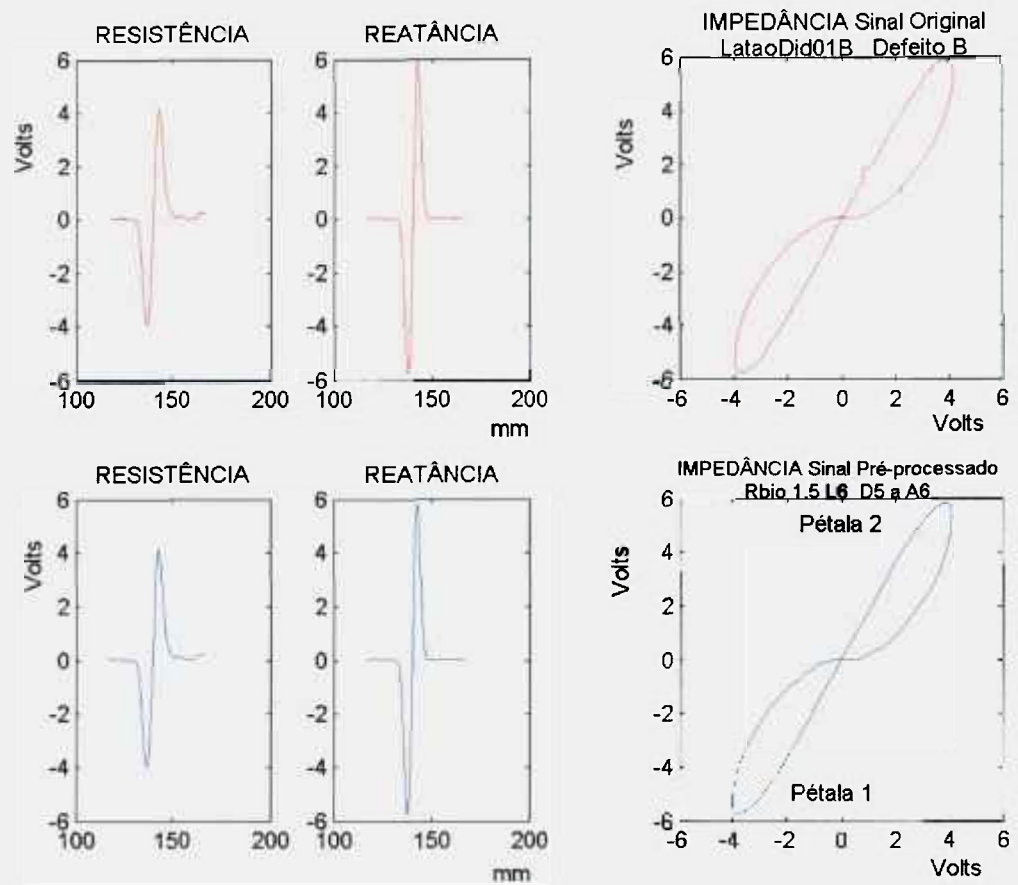


Figura 7.30: Processamento do sinal do defeito B do tubo LataoDid01

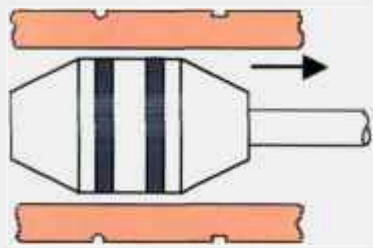
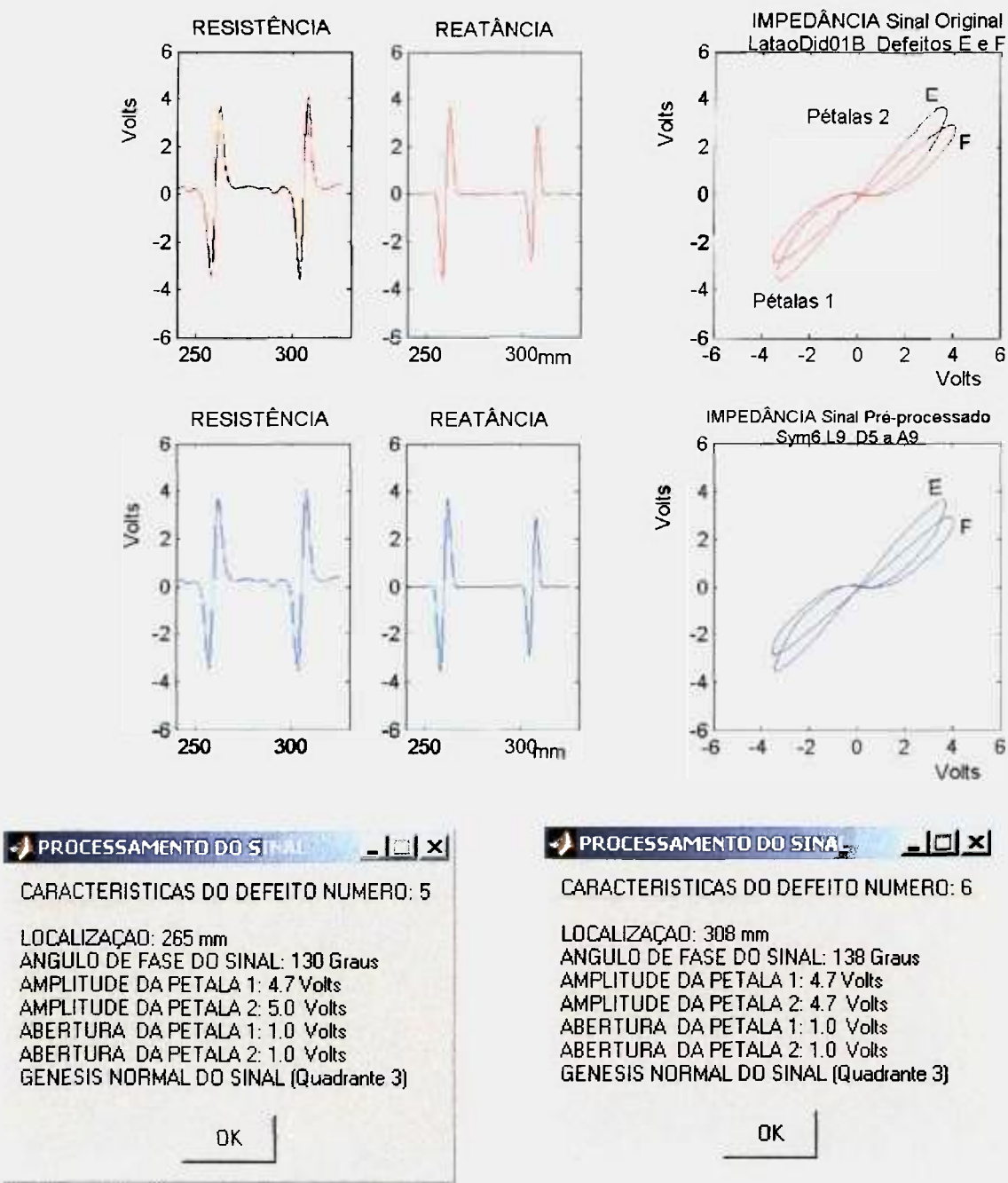


Figura 7.31: Processamento dos sinais dos defeitos E e F do tubo LataoDid01

Os valores de ângulo de fase, amplitude, abertura e profundidade dos defeitos do tubo LataoDid01 são apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1: Características dos sinais e profundidades dos defeitos (tubo LataoDid01)

DEFEITO	α (Graus)	Ap1 (Volts)	Ap2 (Volts)	Ab1 (Volts)	Ab2 (Volts)	P (%)
A	152	3,2	3,0	0,8	0,4	11
B	120	6,7	6,9	1,5	1,6	44
C	133	3,6	3,6	0,8	0,9	30
D	121	10,1	10,0	2,4	2,2	43
E	130	4,7	5,0	1,0	1,0	34
F	138	4,7	4,7	1,0	1,0	27

A relação entre ângulo de fase e profundidade de cada defeito do tubo LataoDid01 está em conformidade com a curva de calibração da inspeção desse tubo para defeitos externos, apresentada na Figura 7.32, onde se observa que a profundidade do defeito é inversamente proporcional ao ângulo de fase α quando o ângulo de fase é maior que 40°.

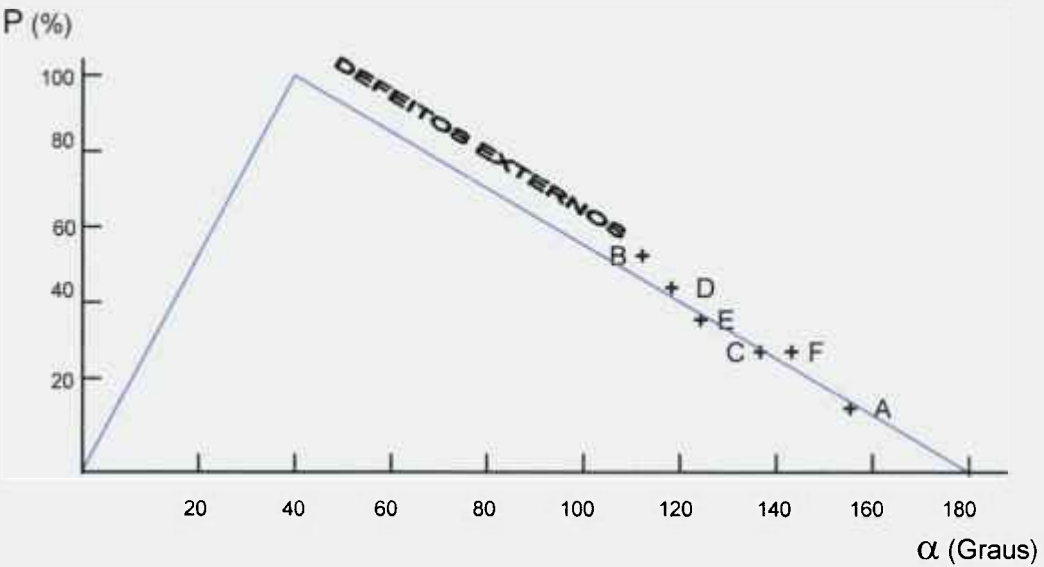


Figura 7.32: Curva de Calibração para o tubo LataoDid01

Comparando as figuras de Lissajous dos defeitos B e C do mesmo tubo LataoDid1 (Figura 7.33), observa-se que os sinais desses defeitos têm as mesmas

características de simetria e o ângulo de fase do defeito B é menor que o ângulo de fase do defeito C pois o defeito B é mais profundo que o defeito C.

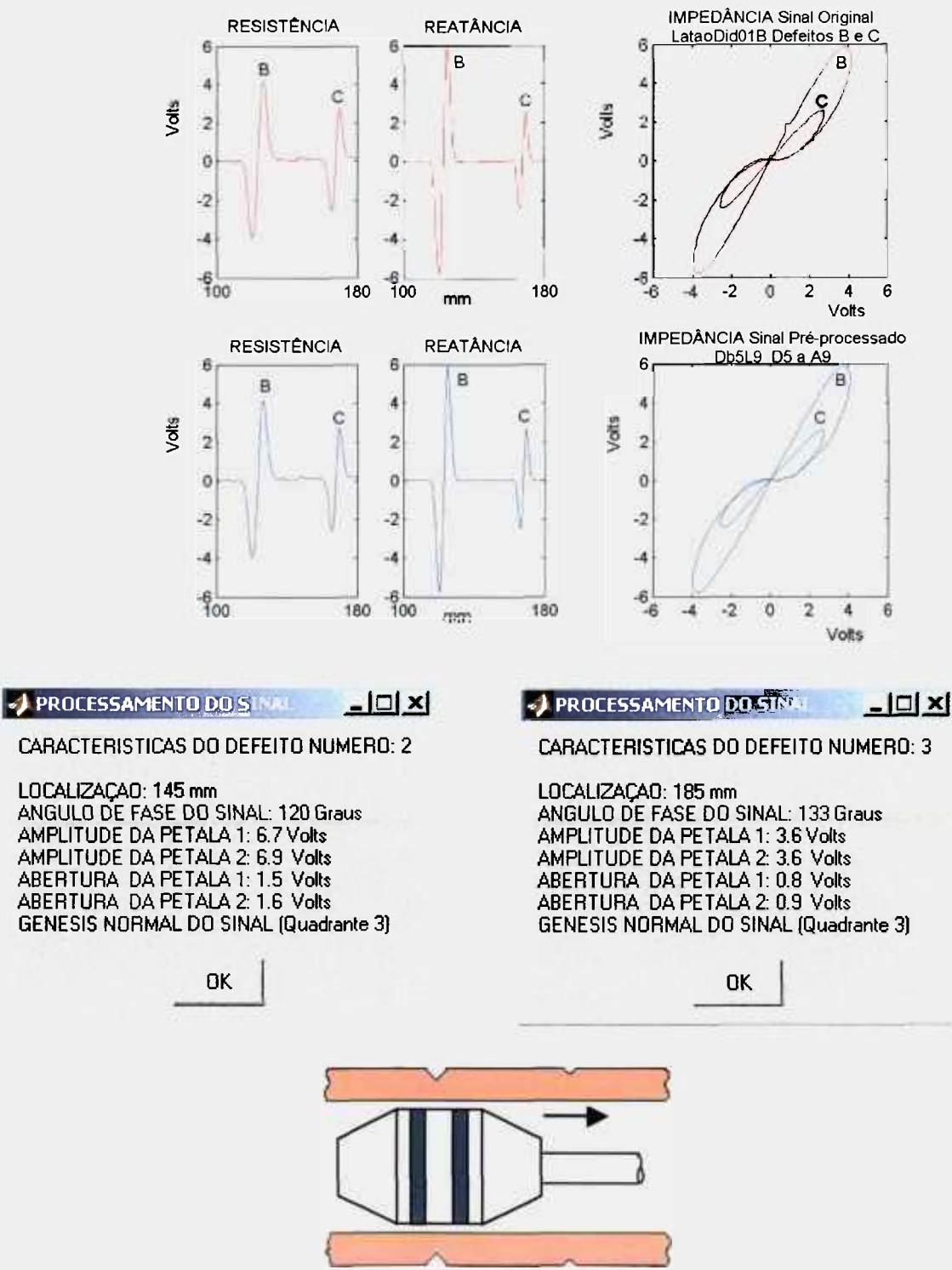


Figura 7.33: Comparação entre os defeitos B e C do tubo LataoDid01

Observando as amplitudes dos sinais dos defeitos B e C, observa-se que a amplitude total de B é maior que a amplitude total de C. Será apresentado a seguir que existe uma relação entre a amplitude do sinal e o volume do defeito.

O volume de material retirado na produção de defeitos circunferenciais concêntricos é dado por:

$$V = \pi D_{CG} A_{STC} \quad (7.25)$$

onde, D_{CG} : diâmetro ao centro geométrico do defeito; e,

A_{STC} : área da seção transversal circunferencial do defeito

A comparação entre os volumes de todos os defeitos do tubo LataoDid01 e as amplitudes totais é apresentada na Tabela 7.2, onde se conclui que o volume de material retirado pelo defeito é proporcional à amplitude total do sinal de Eddy-Current. Especificamente para o tubo LataoDid01, $V = 0,24 (Apt)^2$ com V em mm^3 e Apt em Volts. Também se chegará a esta mesma conclusão nas análises dos defeitos de outros tubos.

Tabela 7.2: Relação entre amplitude total e volume dos defeitos do tubo LataoDid01

DEFEITO	Apt (Volts)	P (mm)	A_{STC} (mm^2)	V (mm^3)
A	6,2	0,17	0,25	11,9
B	13,6	0,66	0,47	29,0
C	7,2	0,45	0,30	17,9
D	20,1	0,65	1,50	89,5
E	9,7	0,51	0,23	13,7
F	9,4	0,41	0,60	35,8

7.3.1.2 Entalhe circunferencial externo, assimétrico, concêntrico ou excêntrico.

O defeito A do tubo LataoDid01 é um entalhe circunferencial externo assimétrico e concêntrico em forma de “v” com um lado vertical e o outro inclinado, com abertura de 60° e largura de 2,0 mm. A sua profundidade é de 0,17 mm, o que corresponde a 11% da espessura da parede do tubo.

O pré-processamento do arquivo LataoDid01B foi realizado pela TW Dmey em 7 níveis com a exclusão das componentes de alta frequência do sinal D1 a D3 e com a manutenção das componentes de baixa e de média frequências D4 a D7 bem como da aproximação A7.

O defeito A é o defeito número 1 do tubo LataoDid01 selecionado pela opção “SELECIONAR O DEFEITO PARA ANÁLISE” do menu principal do PPS.

A Figura 7.34 apresenta o sinal exibido pelo PPS na opção “EXIBIR SINAL DO DEFEITO”, um esquema da passagem da sonda pelo defeito e o processamento do sinal gerado pela opção “EXTRAIR CARACTERÍSTICAS DO SINAL”.

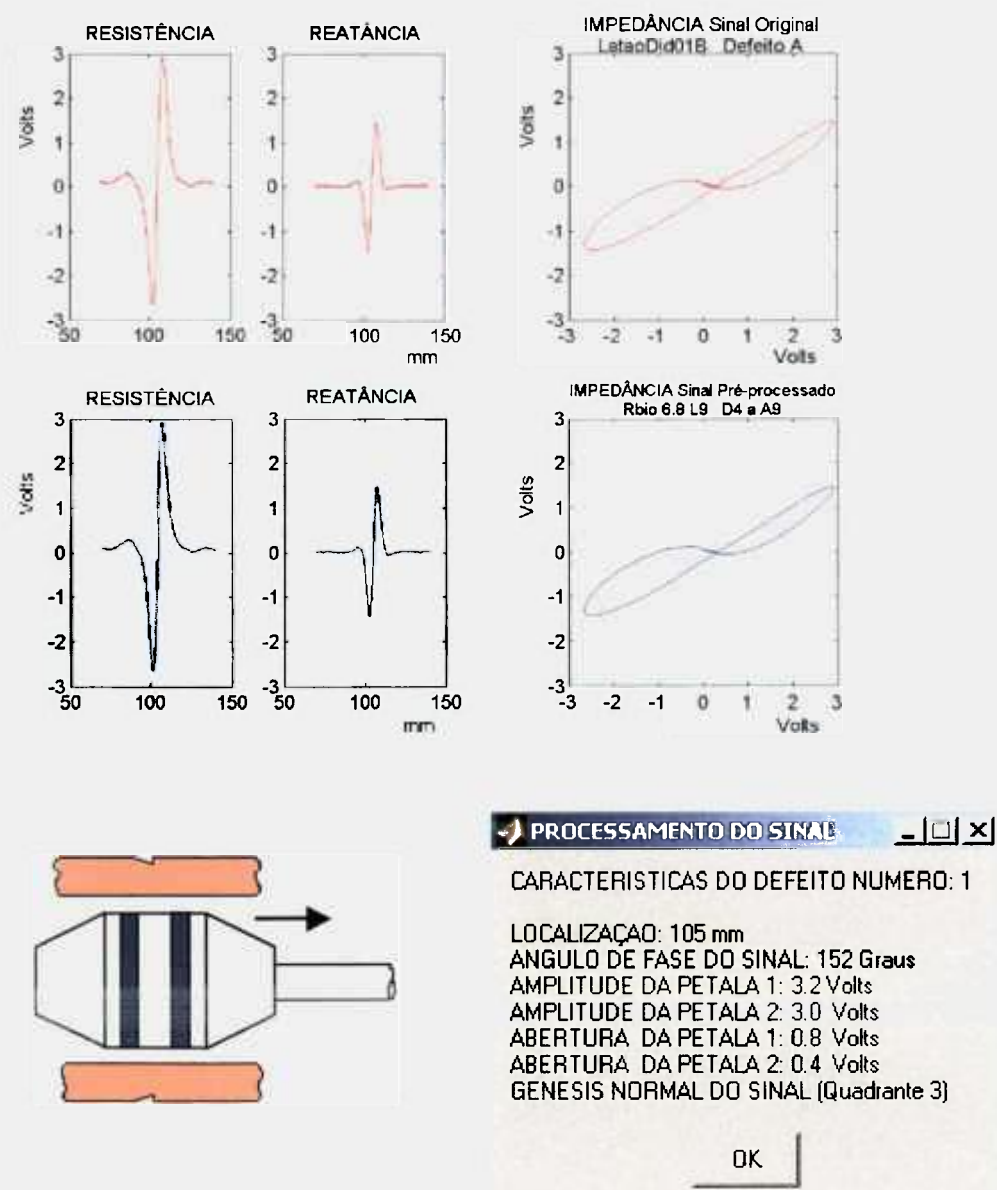


Figura 7.34: Processamento do sinal do defeito A do tubo LataoDid01

Da Figura 7.34 extraem-se as seguintes informações:

- a) ângulo de fase é 152° ;
- b) as amplitudes $Ap1$ e $Ap2$ têm valores próximos;
- c) as aberturas $Ab1$ e $Ab2$ têm valores diferentes; e,
- d) a formação do sinal é normal no Quadrante 3.

A figura de Lissajous deste sinal é visualmente assimétrica com o valor da Abertura 1 (0,8 Volts) diferente do valor da Abertura 2 (0,4 Volts).

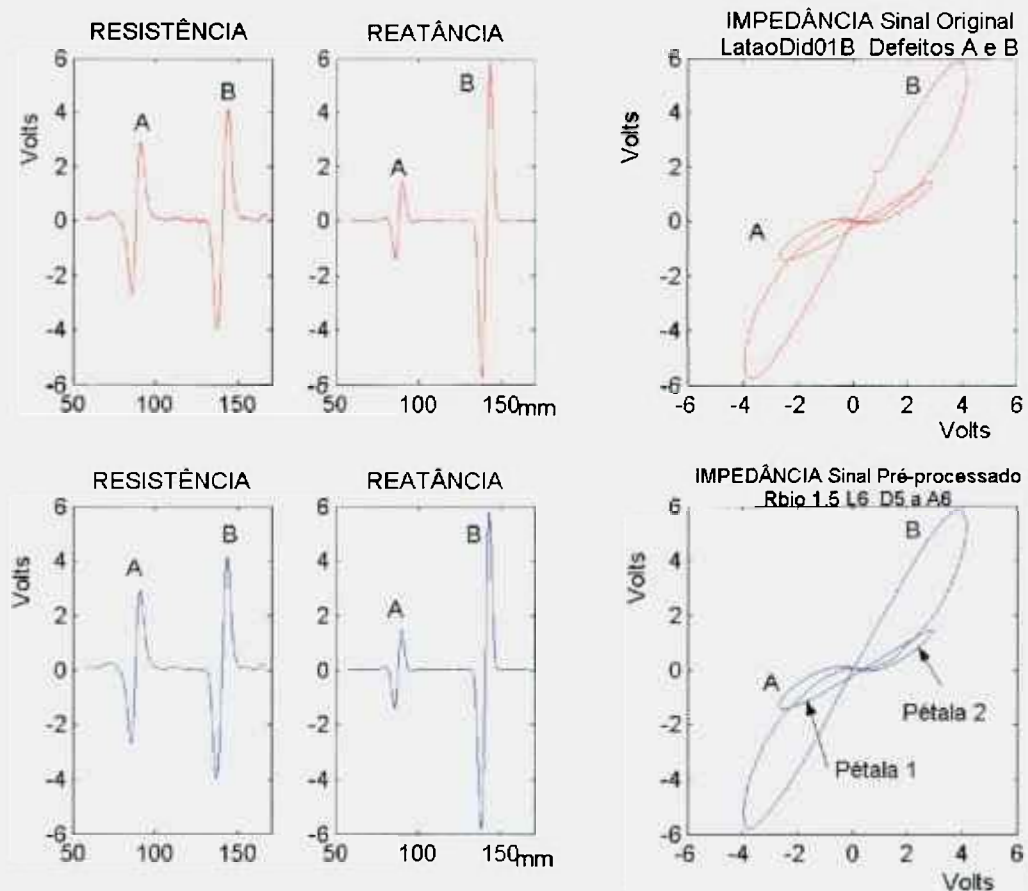
Além da já mencionada relação entre o ângulo de fase e a profundidade do defeito, observa-se que o sinal é assimétrico e o defeito é assimétrico, onde assimétrico para o sinal significa que $Ab1 \neq Ab2$.

A Figura 7.35 apresenta uma comparação entre os sinais dos defeitos A e B do tubo LataoDid01, onde se observa a diferença entre um sinal assimétrico (A) e um sinal simétrico (B).

No sinal do defeito A a abertura da Pétala 1 é maior que a abertura da Pétala 2. Será concluído a seguir que a diferença nas aberturas está relacionada com a forma do defeito.

Para um referencial colocado na sonda movendo-se da esquerda para a direita, o defeito A é uma rampa plana descendente que inicia na superfície externa do tubo e que termina abruptamente em uma parede vertical que sobe até a superfície externa do tubo. Esta forma de defeito gera uma figura de Lissajous assimétrica com a abertura da Pétala 1 correspondendo à rampa e a abertura da Pétala 2 correspondendo à parede vertical.

Portanto, conclui-se que a profundidade do defeito aumenta quando a abertura da pétala 1 é maior que a abertura da pétala 2.



PROCESSAMENTO DO SINAL

CARACTERÍSTICAS DO DEFEITO NUMERO: 1

LOCALIZAÇÃO: 105 mm
ÂNGULO DE FASE DO SINAL: 152 Graus
AMPLITUDE DA PETALA 1: 3.2 Volts
AMPLITUDE DA PETALA 2: 3.0 Volts
ABERTURA DA PETALA 1: 0.8 Volts
ABERTURA DA PETALA 2: 0.4 Volts
GENESIS NORMAL DO SINAL (Quadrante 3)

OK

PROCESSAMENTO DO SINAL

CARACTERÍSTICAS DO DEFEITO NUMERO: 2

LOCALIZAÇÃO: 145 mm
ÂNGULO DE FASE DO SINAL: 120 Graus
AMPLITUDE DA PETALA 1: 6.7 Volts
AMPLITUDE DA PETALA 2: 6.9 Volts
ABERTURA DA PETALA 1: 1.5 Volts
ABERTURA DA PETALA 2: 1.6 Volts
GENESIS NORMAL DO SINAL (Quadrante 3)

OK

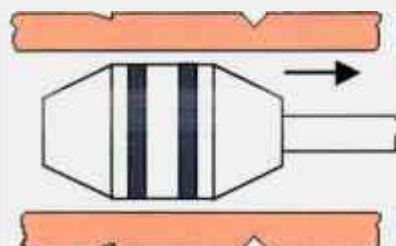


Figura 7.35: Comparação entre os sinais dos defeitos A e B do tubo LataoDid01

Na Figura 7.36 é apresentado o processamento do sinal de um outro entalhe circunferencial externo e assimétrico, ou seja, o defeito K do tubo InoxDid03 (Inconel 600). Este defeito é excêntrico, com 1,5 mm de extensão e a sua profundidade máxima é de 0,65 mm (50% da espessura do tubo).

O defeito K é o defeito número 11 do tubo InoxDid03 e tem a forma de um “v” com um lado reto vertical e o outro lado curvo e inclinado. Dessa forma, se um referencial for colocado na sonda, movendo-se da esquerda para a direita, o defeito K é uma redução vertical abrupta de espessura a partir da superfície externa do tubo, seguida de uma rampa curva ascendente que inicia na parte inferior da parede vertical e termina na superfície externa do tubo.

O sinal original foi pré-processado com a TW Biorthogonal Reversa 1.5 em 6 níveis, com a exclusão das componentes do sinal de alta e de média frequências D1 a D4 e com a manutenção da componente de baixa frequência D5 bem como da aproximação A6.

O processamento do sinal é apresentado na Figura 7.36 de onde se extraem as seguintes características:

- a) o ângulo de fase é 138° ;
- b) as amplitudes $Ap1$ e $Ap2$ têm valores próximos;
- c) as aberturas $Ab1$ e $Ab2$ têm valores diferentes; e,
- d) a gênese do sinal é normal no Quadrante 3.

A figura de Lissajous do defeito K do tubo InoxDid03 é visualmente assimétrica e resulta invertida quando comparada com a figura do defeito A do tubo LataoDid01, pois a Pétala 1 é a maior do tubo LataoDid01 enquanto que a Pétala 2 é a maior do tubo InoxDid03. Essa inversão deve-se ao sentido da inclinação da rampa do defeito pois, enquanto no tubo LataoDid01 a rampa é descendente, no tubo InoxDid03 a rampa é ascendente.

Portanto, da análise apresentada para o tubo de Inconel 600, conclui-se que a profundidade do defeito diminui quando a abertura da pétala 1 é menor que a abertura da pétala 2. Nesta análise confirma-se também que a profundidade é inversamente proporcional ao ângulo de fase para $\alpha > 40^\circ$.

Comparando o defeito A do tubo LataoDid01 com o defeito K do tubo InoxDid03, observa-se que o defeito A do tubo de latão é concêntrico enquanto que o defeito K do tubo de Inconel 600 é excêntrico. Neste trabalho, foram utilizadas sondas dotadas de bobinas circunferenciais com as quais não é possível explorar a excentricidade do defeito para a determinação da sua posição angular.

Neste caso, seria necessária a utilização de sondas dotadas de múltiplas bobinas radiais, o que está fora dos objetivos deste trabalho e que é uma proposta para trabalhos futuros.

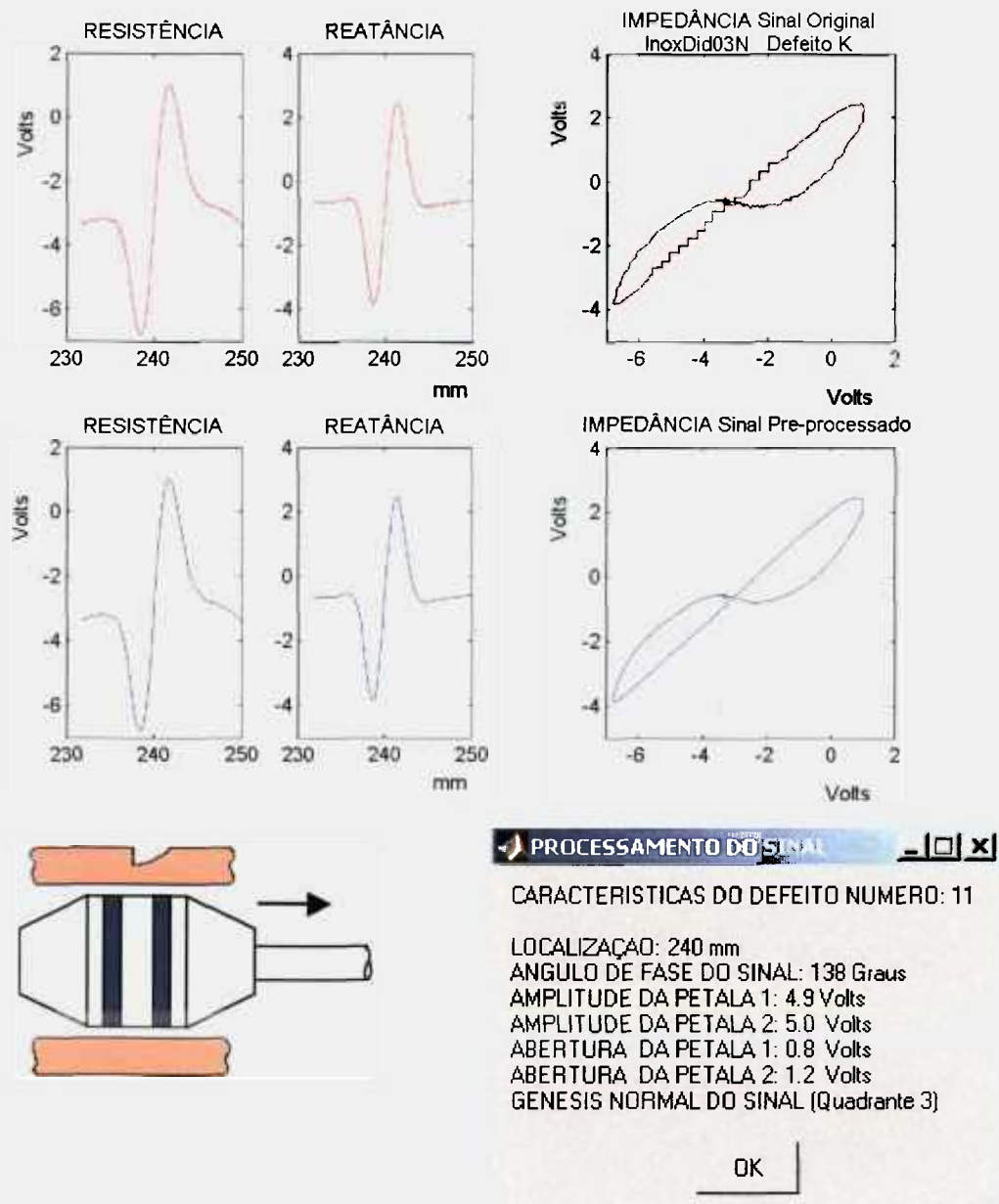


Figura 7.36: Processamento do sinal do defeito K do tubo InoxDid03

7.3.1.3 Entalhe circunferencial externo, simétrico, excêntrico e de grande extensão.

Na Figura 7.37 é apresentado o processamento dos sinais dos defeitos N e O do tubo InoxDid03 (Inconel 600). Esses defeitos são entalhes circunferenciais externos, simétricos e excêntricos, com 10 mm de extensão. Esses entalhes são os defeitos números 14 e 15 do tubo e tem a forma de “U”. A profundidade do entalhe N é de 0,65 mm (50% da espessura do tubo) e a profundidade do entalhe O é de 0,325mm (25% da espessura do tubo).

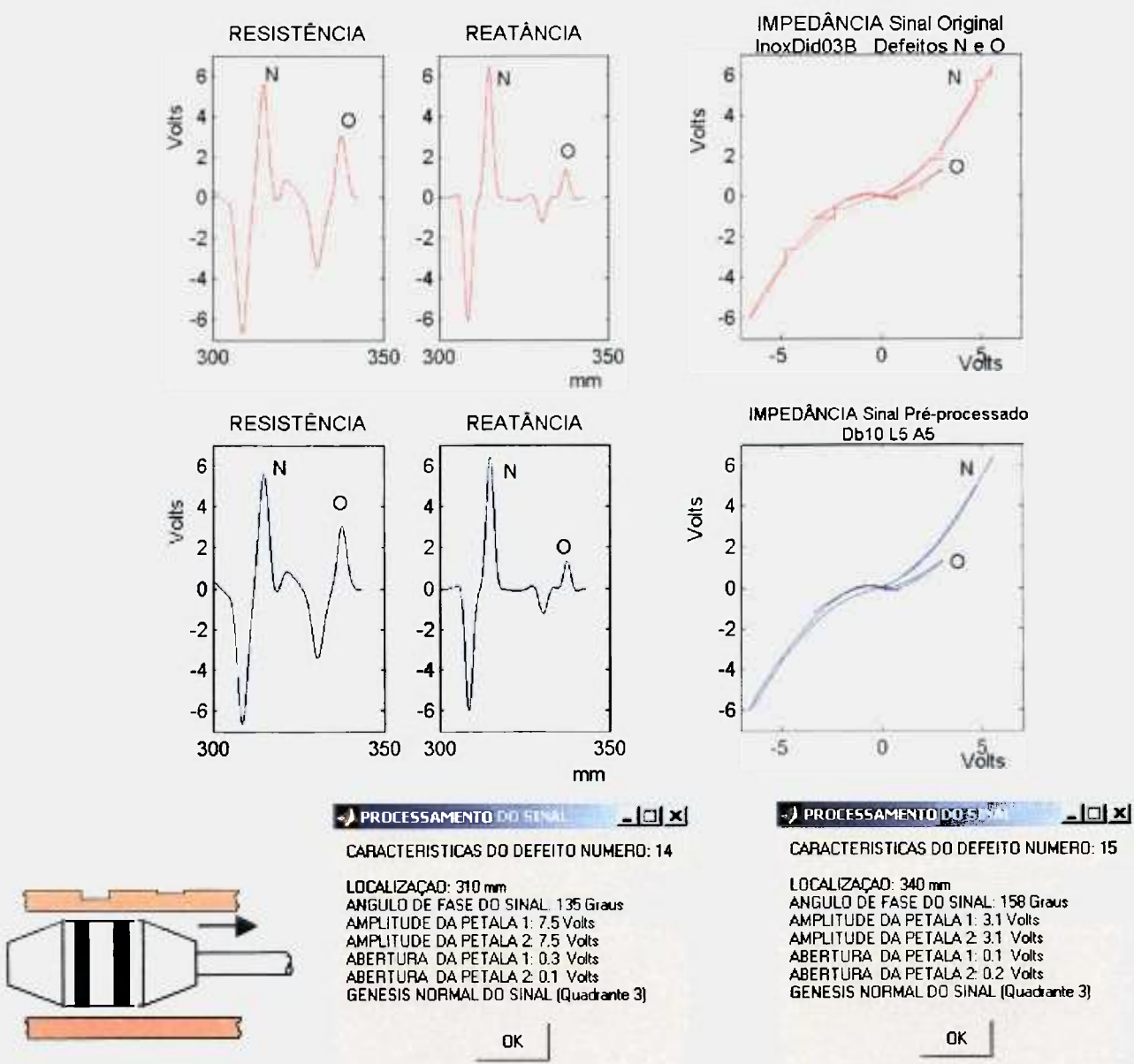


Figura 7.37: Processamento dos sinais dos defeitos N e O do tubo InoxDid03

Os sinais originais foram pré-processados com a TW Db10 em 5 níveis com a exclusão de todos os detalhes do sinal, mantendo-se apenas a aproximação A, ou seja, apenas o sinal DC.

Da Figura 7.37 para o defeito N observa-se que:

- a) o ângulo de fase é 135° ;
- b) as amplitudes $Ap1$ e $Ap2$ têm valores iguais;
- c) as aberturas $Ab1$ e $Ab2$ têm valores muito pequenos; e,
- d) a formação do sinal é normal no Quadrante 3.

Para o defeito O vem que:

- a) o ângulo de fase é 158° ;
- b) as amplitudes $Ap1$ e $Ap2$ têm valores iguais;
- c) as aberturas $Ab1$ e $Ab2$ têm valores muito pequenos; e,
- d) a gênese do sinal é normal no Quadrante 3.

As figuras de Lissajous desses dois defeitos são visualmente simétricas e os valores das amplitudes são semelhantes. As aberturas, embora pequenas, são diferentes entre si. Isto se deve à imprecisão na fabricação do defeito pois a superfície não é perfeitamente cilíndrica, mas sim levemente cônica.

Para esta relação sinal defeito confirma-se a conclusão anterior de que defeitos simétricos têm figuras de Lissajous simétricas.

Confirma-se também que para ângulos de fase maiores que 40° , a profundidade é inversamente proporcional ao ângulo de fase.

Quanto à forma da figura de Lissajous pode-se concluir que para valores de aberturas de pétalas muito menores que os valores das amplitudes, ou seja, $Ab1 \ll Ap1$ e $Ab2 \ll Ap2$, o defeito é de grande extensão.

7.3.2 Furos

Os furos podem ser passantes ou não passantes, internos ou externos. Neste trabalho, foram produzidos furos por meio de usinagem ou eletroerosão em tubos de latão e aço inox com a finalidade de calibração da aparelhagem de inspeção por Eddy-Current e extração de características dos sinais.

7.3.2.1 Furo passante

A Figura 7.38 apresenta a figura de Lissajous pré-processada do furo passante (defeito C) do tubo InoxDid03 (Inconel 600), onde se observa que a figura é simétrica pois o furo é simétrico e que o ângulo de fase é 40° devido à calibração.

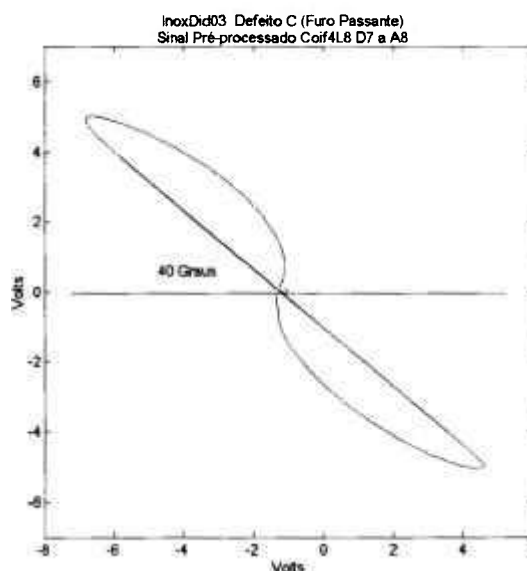


Figura 7.38: Figura de Lissajous do furo passante do tubo InoxDid03

Qualquer furo passante tem as mesmas características de simetria e ângulo de fase, variando apenas a amplitude em função do diâmetro.

7.3.2.2 Furo não passante

O código ASME não especifica calibração por meio de furo não passante interno. No entanto, considerando que esse tipo de defeito pode existir em tubos de Geradores de Vapor, foi produzido para pesquisa um furo de fundo plano, $\varnothing 2,0$ mm, com profundidade de 50% da espessura da parede interna do tubo de Inconel 600 (defeito B), cuja figura de Lissajous é apresentada na Figura 7.39 e onde se observa a correspondência entre a simetria do sinal e a simetria do defeito.

Observa-se também que o ângulo de fase é 20° , o que está de acordo com a curva de calibração para este tipo de defeito, ou seja, defeitos internos apresentam um ângulo de fase menor que 40° e a profundidade é proporcional ao ângulo de fase.

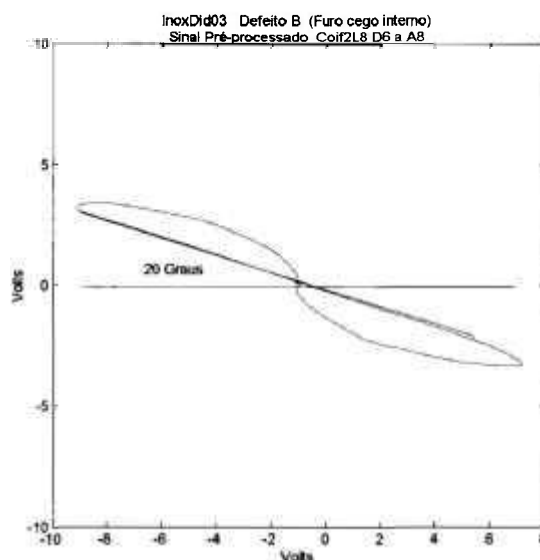


Figura 7.39: Figura de Lissajous do furo não passante interno do tubo InoxDid03

A pesquisa dos furos externos não passantes foi realizada por meio da análise dos sinais dos defeitos do tubo LataoDid02. Esse tubo foi produzido com 9 furos externos, $\varnothing$ 2,0 mm, com profundidades variando de 10% a 90% da espessura da parede do tubo. Foram selecionados os furos com profundidades de 20% a 80%, cujos sinais originais e pré-processados são apresentados na Figura 7.40.

Na Figura 7.41 são apresentadas as figuras de Lissajous ampliadas dos 3 defeitos menores do tubo LataoDid02 cujas profundidades são 20%, 30% e 40% da espessura da parede, onde se observa que, com o aumento da profundidade do defeito, a amplitude do sinal aumenta e o ângulo de fase diminui.

Na Figura 7.42 apresentam-se os sinais dos furos de 50% a 80% de profundidade do mesmo tubo onde também se observa que defeitos com profundidades maiores têm amplitudes maiores e ângulos de fase menores.

Para os defeitos analisados do tubo LataoDid02, foram calculados os volumes dos furos e comparados com as amplitudes dos sinais, conforme apresentado na Tabela 7.3 e na Figura 7.43.

Da Figura 7.43 observa-se que o volume de material retirado pelo defeito é proporcional à amplitude total do sinal de Eddy-Current.

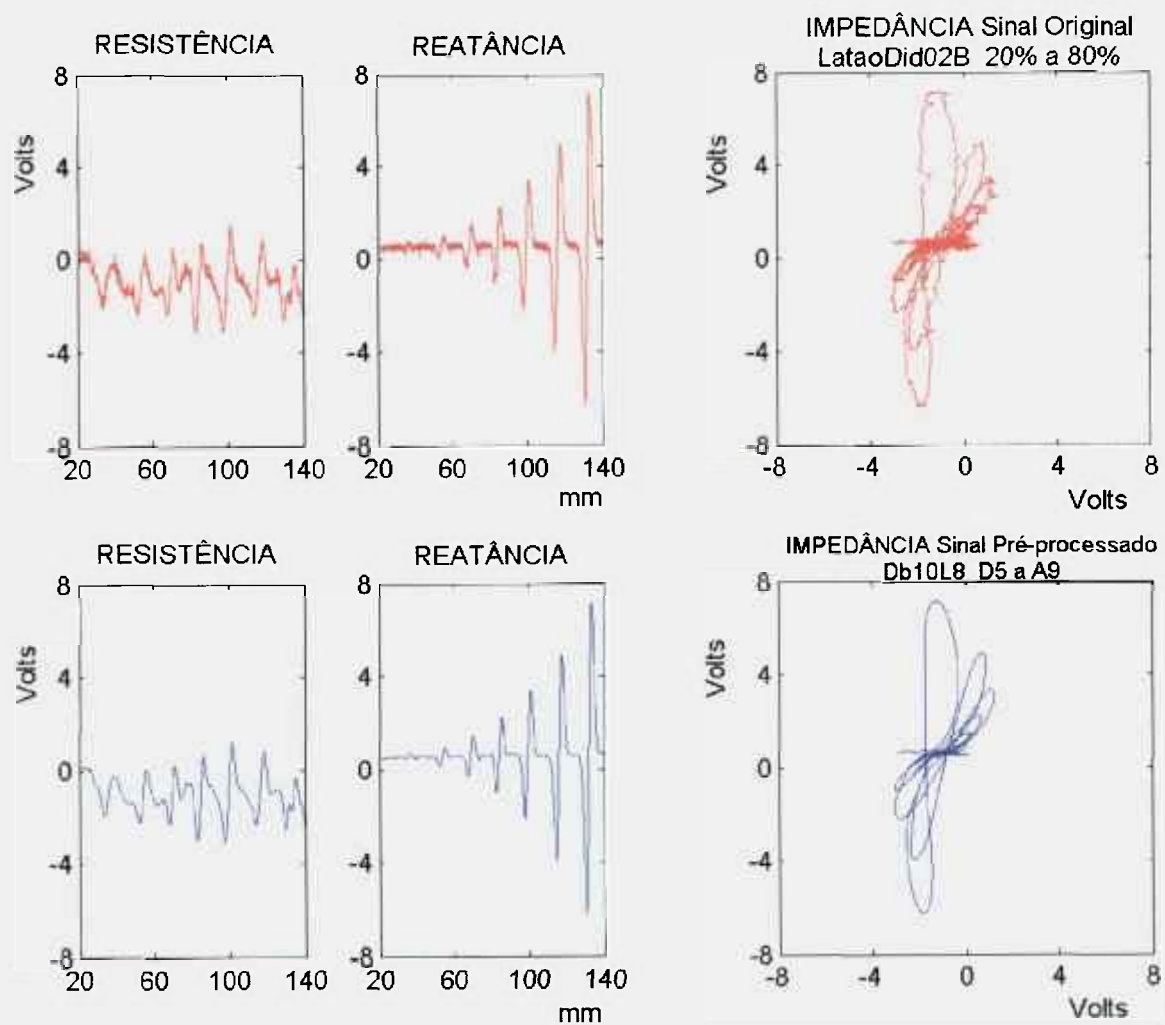


Figura 7.40: Furos não passantes externos (tubo LataoDid02)

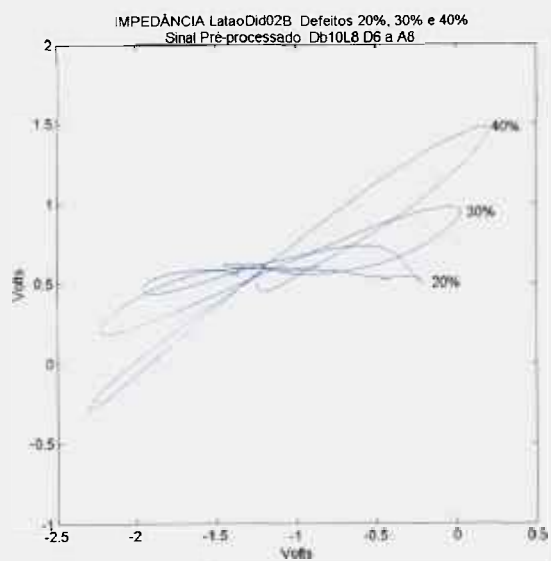


Figura 7.41: Furos não passantes profundidades 20%, 30% e 40% (tubo LataoDid02)

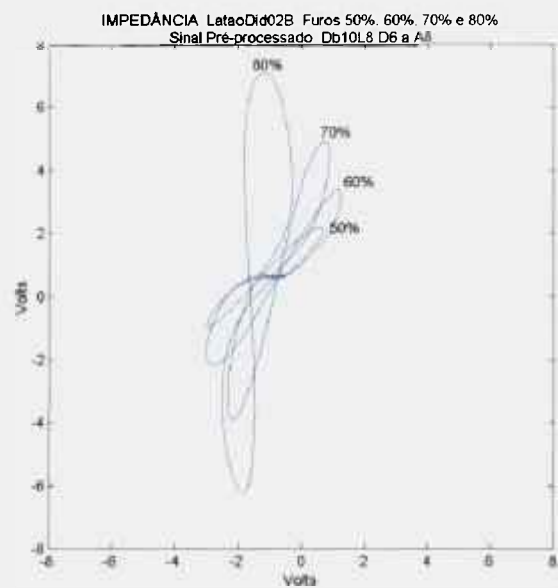


Figura 7.42: Furos não passantes profundidades 50% a 80% (tubo LataoDid02)

Tabela 7.3: Volume dos defeitos e amplitudes dos sinais do tubo LataoDid02

P (%)	P (mm)	V (mm ³)	Apt (Volts)
20	0,30	0,94	1,8
30	0,45	1,41	2,4
40	0,60	1,89	3,1
50	0,75	2,36	4,6
60	0,90	2,83	6,8
70	1,05	3,30	9,1
80	1,20	3,77	13,2

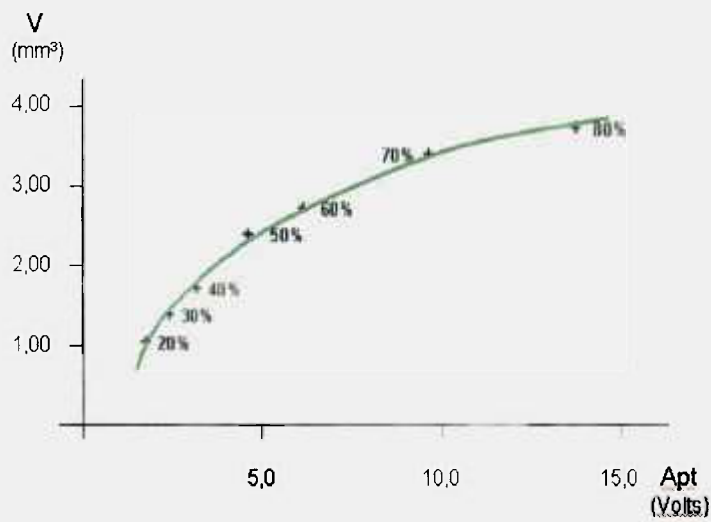


Figura 7.43: Volume dos defeitos e amplitude dos sinais (tubo LataoDid02)

Do tubo LataoDid03 foram comparadas as figuras de Lissajous de 2 furos cegos externos com diâmetros diferentes e profundidades iguais com a finalidade de comprovar que o ângulo de fase não varia com a profundidade e que o volume do defeito é proporcional à amplitude do sinal. Na Figura 7.44 são apresentadas as figuras de Lissajous dos furos $\varnothing$ 2,8 mm e $\varnothing$ 4,8 mm. Na Tabela 7.4 e na Figura 7.45 é apresentada a relação entre os volumes de todos os defeitos do mesmo tubo e as amplitudes totais dos sinais.

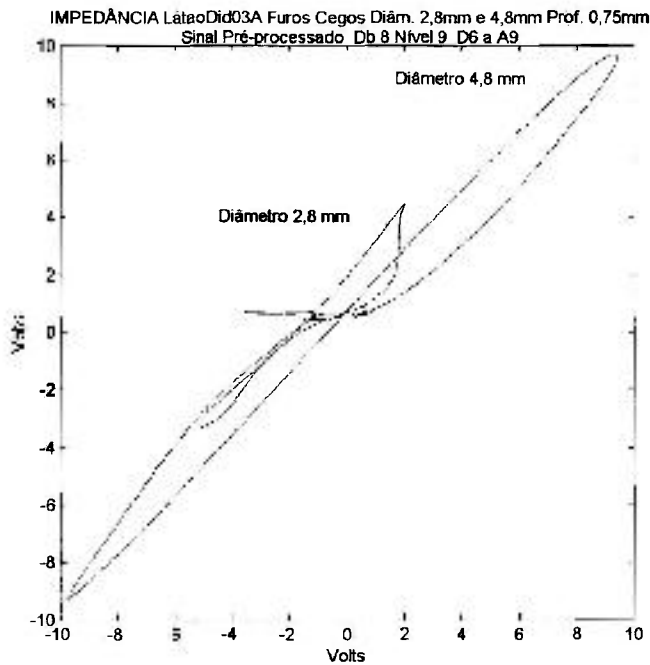


Figura 7.44: Furos cegos $\varnothing$ 2,8 e 4,8 mm do tubo LataoDid03

Tabela 7.4: Volume dos defeitos e amplitudes dos sinais do tubo LataoDid03

DEFEITO	DIÂMETRO (mm)	PROFUNDIDADE (mm)	V (mm ³)	Apt (Volts)
A	1,0	0,75	0,59	1,8
B	2,0	0,75	2,36	5,0
C	2,8	0,75	4,62	10,2
D	4,8	0,75	13,57	26,6

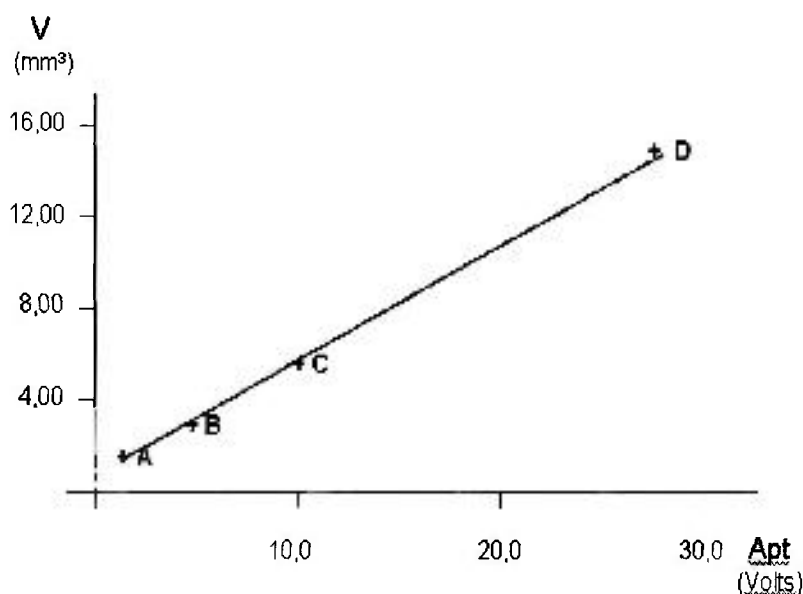


Figura 7.45: Volume dos defeitos e amplitude dos sinais (tubo LataoDid3)

7.3.3 Entalhes Oblongos Longitudinais de grande extensão.

No tubo LataoDid04 foram pesquisados os sinais de 2 entalhes oblongos longitudinais com 15,0 mm de extensão, profundidade 0,75 mm, nos diâmetros 2,0 mm e 2,8 mm, com o objetivo de pesquisar os sinais de defeitos longitudinais de grande extensão, excêntricos e com profundidade constante. As Figuras 7.46 e 7.47 apresentam os processamentos desses sinais, onde se confirma que:

- defeitos de grande extensão possuem aberturas pequenas quando comparadas com as amplitudes;
- o volume do defeito é proporcional à amplitude do sinal de Eddy-Current; e,
- para profundidade constante, o ângulo de fase não varia. Para o defeito A o ângulo de fase é 162°. Para o defeito B é 161° e para o defeito C é 159°.

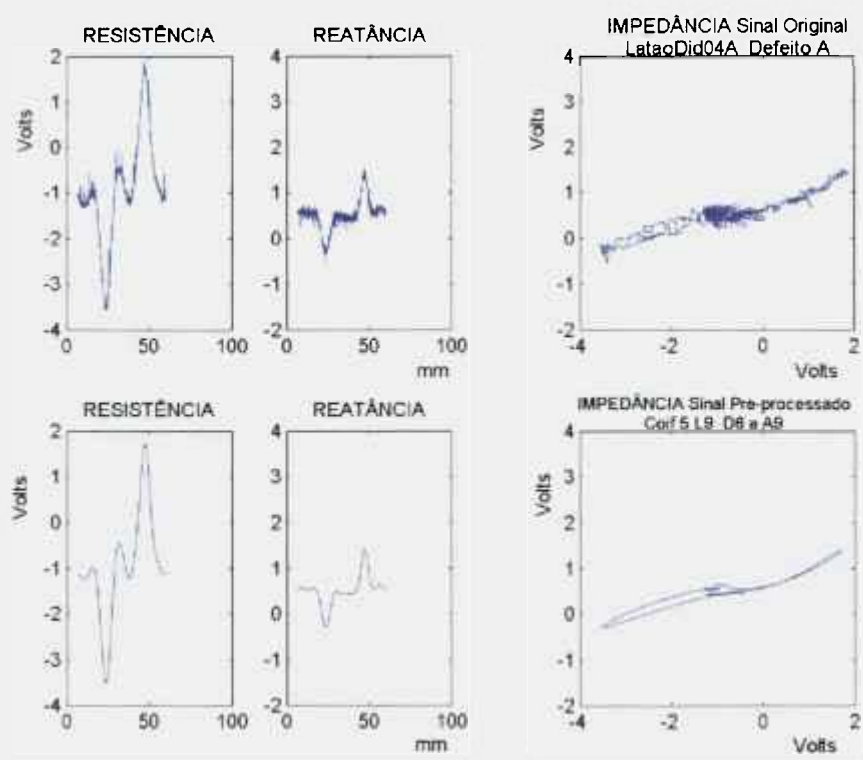


Figura 7.46: Furo oblongo $\varnothing$ 2,0 mm do tubo LataoDid04

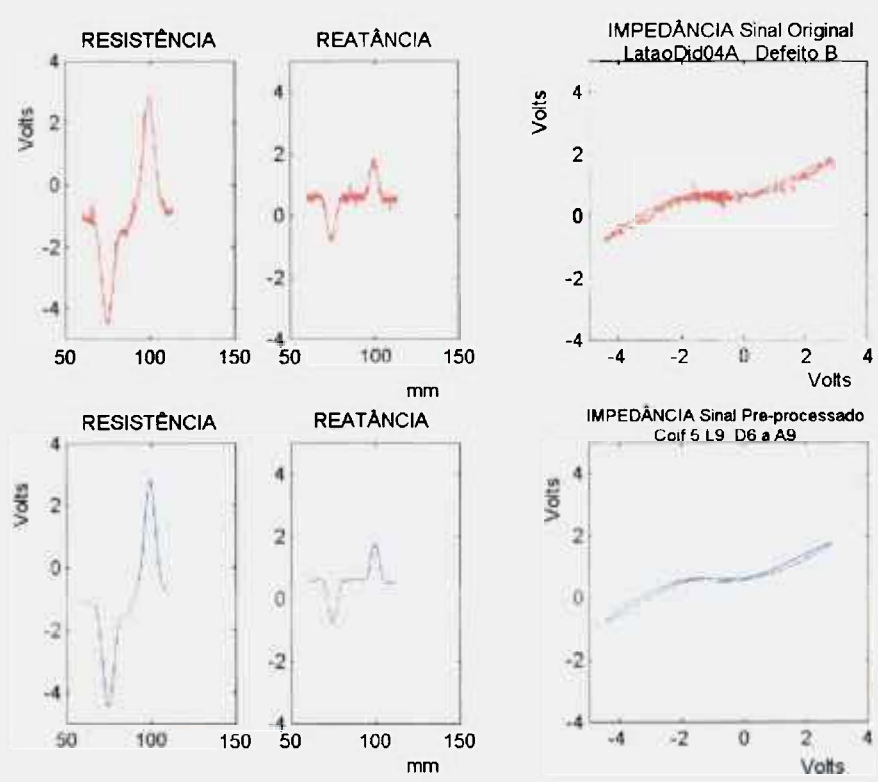


Figura 7.47: Furo oblongo $\varnothing$ 2.8 mm do tubo LataoDid04

7.3.4 Conclusões sobre a Base de Conhecimento do Sistema Fuzzy

A seguir é apresentado um sumário com as relações entre as dimensões/forma dos defeitos e as características extraídas das figuras de Lissajous por meio do processamento de sinais. Este é o resultado da aplicação da metodologia proposta neste trabalho aos sinais dos defeitos artificiais cuja relação sinal-ruído permitiu a extração de características.

- 1) Defeitos simétricos têm figuras de Lissajous simétricas.
- 2) Defeitos assimétricos têm figuras de Lissajous assimétricas.
- 3) Defeitos internos têm ângulo de fase entre $\sim 0^\circ$ e $\sim 40^\circ$.
- 4) A profundidade de um defeito interno é proporcional ao ângulo de fase.
- 5) Defeitos passantes têm ângulo de fase $\sim 40^\circ$.
- 6) Defeitos externos têm ângulo de fase entre $\sim 40^\circ$ e $\sim 180^\circ$.
- 7) A profundidade de um defeito externo é inversamente proporcional ao ângulo de fase.
- 8) Defeitos localizados têm aberturas menores que as amplitudes.
- 9) Defeitos extensos têm aberturas muito menores que as amplitudes.
- 10) Se a profundidade de um defeito aumenta, a abertura da pétala 1 é maior que a abertura da pétala 2.
- 11) Se a profundidade de um defeito diminui, a abertura da pétala 1 é menor que a abertura da pétala 2.
- 12) O volume de um defeito é proporcional à amplitude do sinal.

7.4 Entradas do Sistema Fuzzy e nebulização

As entradas do Sistema Fuzzy são as características extraídas dos sinais de Eddy-Current, ou seja, o Ângulo de Fase, a Amplitude Total (Apt) e as Aberturas das pétalas (Ab1 e Ab2).

Para a operação do sistema Fuzzy, as entradas são nebulizadas, ou seja, os conjuntos não nebulosos são transformados em conjuntos nebulosos (equações 7.19 e 7.20). As entradas são convertidas em variáveis lingüísticas nebulosas pela aplicação de um nebulizador F com funções de pertinência μ associadas aos modificadores de intensidade *muito pequeno (MP)*, *pequeno (P)*, *médio (M)*, *grande (G)* e *muito grande (MG)* que alteram os limites lingüísticos.

Na nebulização, estima-se o grau de pertinência de cada entrada do sistema. Uma vez que a entrada do sistema é nebulizada, ela se torna uma entrada Fuzzy que pode ser utilizada no processo de inferência.

As abrangências e os centros das funções de pertinência foram estabelecidos com base nos processamentos realizados e são apresentados a seguir.

A Figura 7.48 apresenta os modificadores de intensidade e as funções de pertinência nebulizando a entrada Abertura 1 cujos valores variam de 0 a 2 Volts. Um diagrama semelhante é utilizado para a Abertura 2.

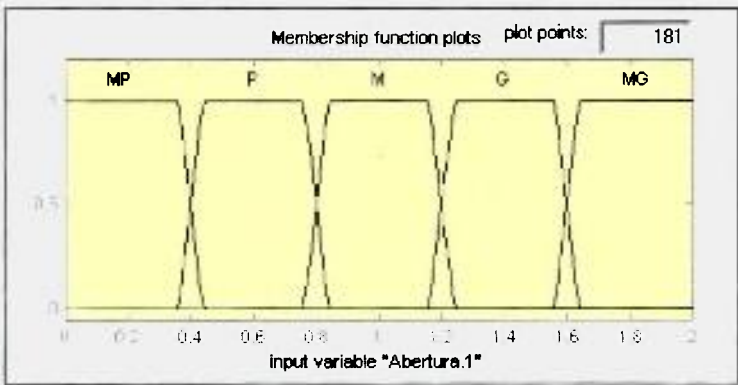


Figura 7.48: Nebulização da entrada Abertura 1

A Figura 7.49 apresenta a nebulização da entrada Ângulo de Fase de 0° a 180° com os modificadores de intensidade MP, P, M, G e MG aplicados aos subconjuntos nebulosos da região do defeito *interno (I)* e *externo (E)*.

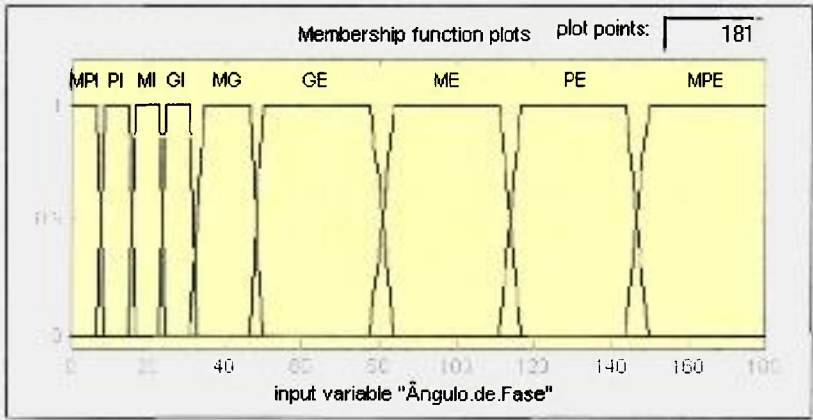


Figura 7.49: Nebulização da entrada Ângulo de Fase

A Figura 7.50 apresenta os modificadores de intensidade *pequeno*, *médio* e *grande* (P, M e G) e as funções de pertinência nebulizando a entrada Amplitude, cujos valores variam de 0 a 21 Volts.

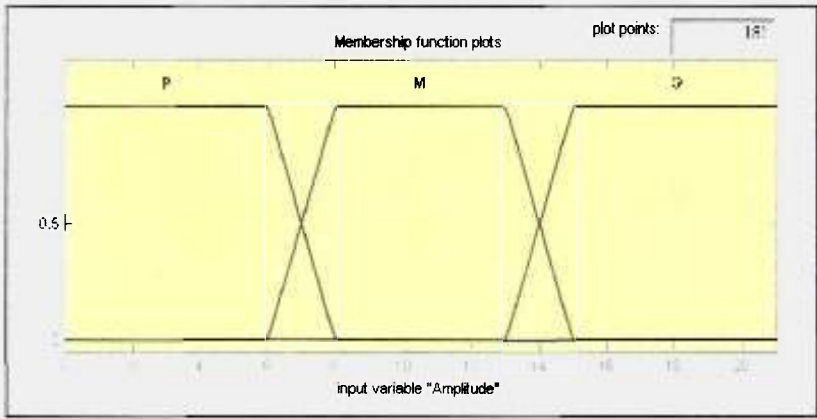


Figura 7.50: Nebulização da entrada Amplitude

7.5 Conjunto de Regras

As regras do sistema de inferência Fuzzy representam as relações entre as entradas e as saídas do sistema. As regras são distribuídas em 5 subconjuntos Fuzzy que classificam o defeito em Interno ou Externo (INT ou OUT), Localizado ou Extenso (LOC ou EXT), Simétrico ou Assimétrico (SIM ou ASSIM), Profundidade Aumenta ou Profundidade Diminui (PROFA ou PROFD) e dimensionam o defeito fornecendo a Profundidade (PROF) e o Volume (VOL). A Tabela 7.5 apresenta os 5 subconjuntos Fuzzy e as respectivas entradas e saídas.

Tabela 7.5: Subconjuntos nebulosos

SUBCONJUNTO NEBULOSO	ENTRADA	SAÍDA
Ângulo – INT,OUT,PROF	Ângulo de Fase	INTERNO ou EXTERNO e PROFUNDIDADE
Ab, Apt – LOC,EXT	Ab1, Ab2, Apt	LOCALIZADO ou EXTENSO
Ab – SIM,ASSIM	Ab1 e Ab2	SIMÉTRICO ou ASSIMÉTRICO
Ab – PROFA,D	Ab1 e Ab2	PROFUNDIDADE AUMENTA ou DIMINUI
Apt – VOL	Apt	VOLUME

As figuras a seguir apresentam a relação entre as entradas e as saídas dos 5 subconjuntos nebulosos.

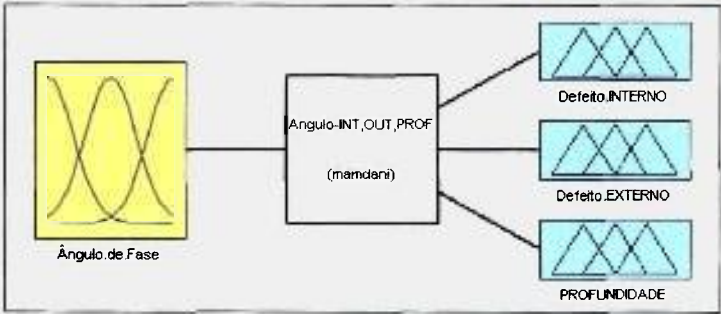


Figura 7.51: Entradas e saídas do subconjunto nebuloso Ângulo – INT,OUT,PROF

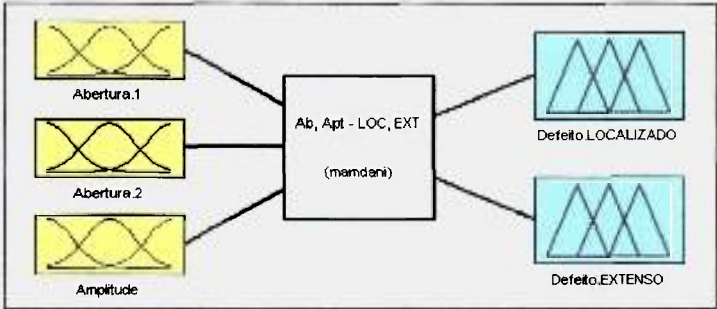


Figura 7.52: Entradas e saídas do subconjunto nebuloso Ab, Apt – LOC,EXT

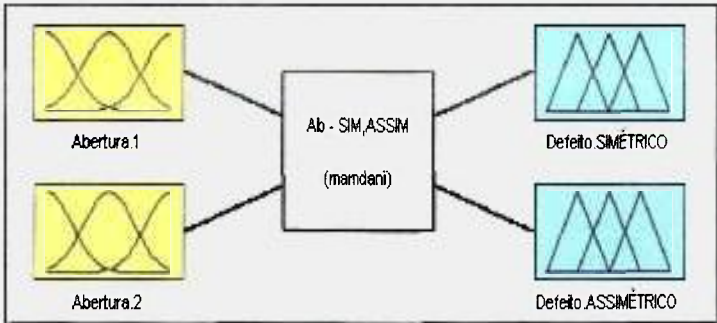


Figura 7.53: Entradas e saídas do subconjunto nebuloso Ab – SIM,ASSIM

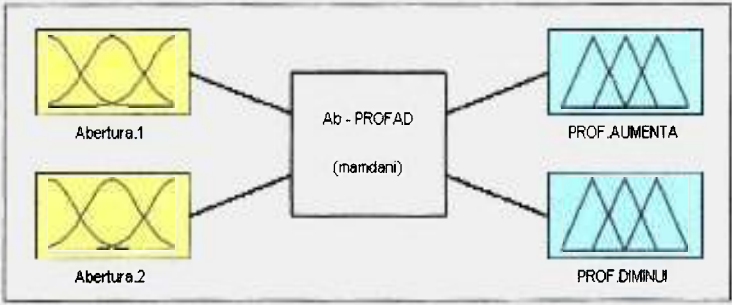


Figura 7.54: Entradas e saídas do subconjunto nebuloso Ab – PROFAD

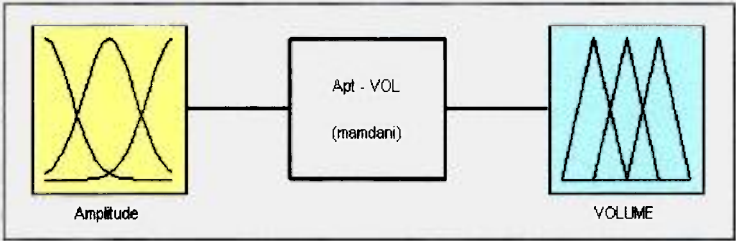


Figura 7.55: Entradas e saídas do subconjunto nebuloso Apt – VOL

As figuras a seguir apresentam algumas das superfícies formadas pela combinação das entradas, saídas e funções de pertinência.

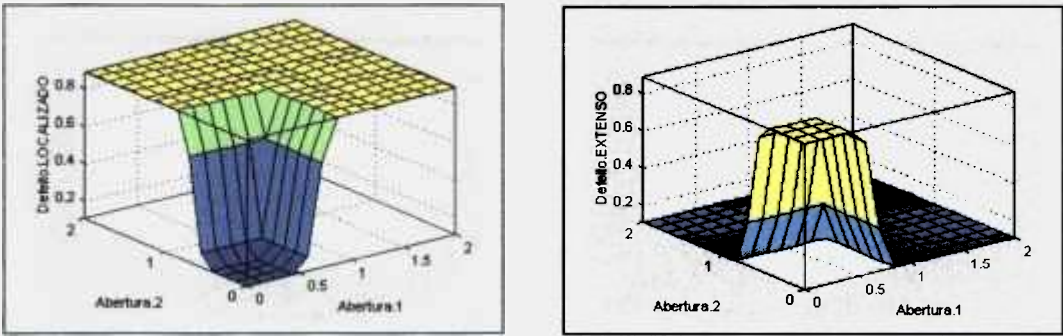


Figura 7.56: Funções de pertinência para o subconjunto nebuloso Ab, Apt – LOC,EXT

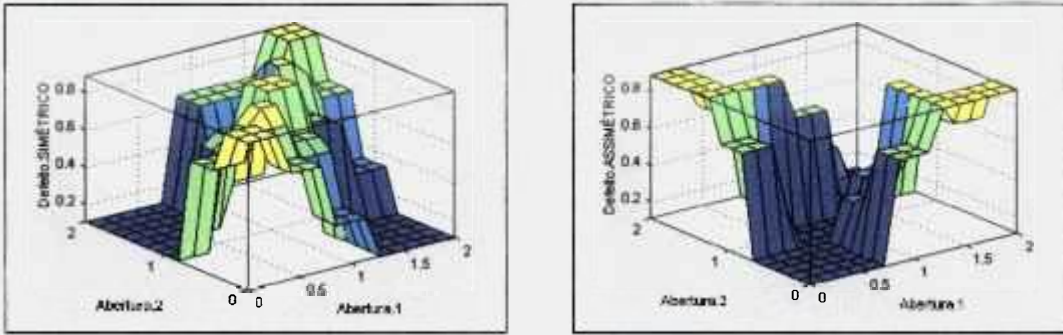


Figura 7.57: Funções de pertinência para o sub-conjunto nebuloso Ab – SIM,ASSIM

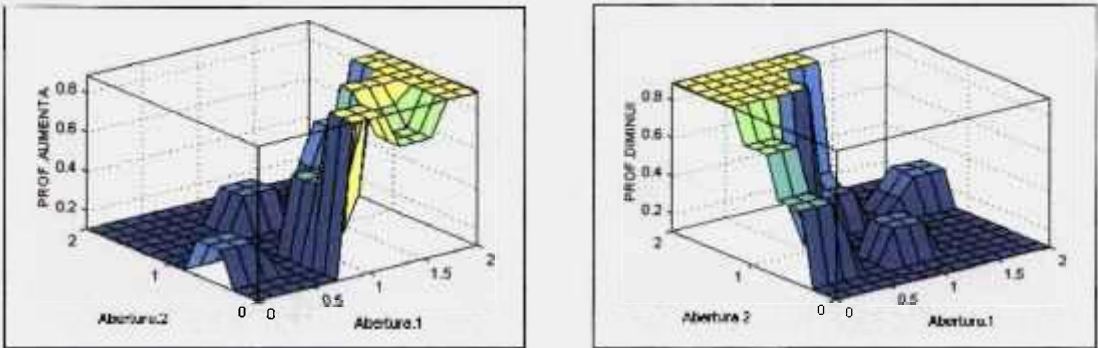


Figura 7.58: Funções de pertinência para o subconjunto nebuloso Ab – PROFA,D

Cada regra tem a forma de uma declaração condicional do tipo SE / ENTÃO. O lado SE da regra possui uma condição. O lado ENTÃO da regra possui uma decisão. As condições das regras correspondem diretamente aos graus de associação (entradas nebulizadas) determinados no processo de nebulização.

Foram desenvolvidas ao todo 91 regras para o processo de decisão da classificação e dimensionamento dos defeitos e são apresentadas nas tabelas a seguir.

Tabela 7.6: Regras do subconjunto nebuloso Ângulo – INT,OUT,PROF

Regra	Antecedente Consequente
1	SE o ângulo de fase é MPI ENTÃO defeito é INTERNO é Verdadeiro, defeito EXTERNO é Falso e a Profundidade é P0
2	SE o ângulo de fase é PI ENTÃO defeito é INTERNO é Verdadeiro, defeito EXTERNO é Falso e a Profundidade é P25
3	SE o ângulo de fase é MI ENTÃO defeito é INTERNO é Verdadeiro, defeito EXTERNO é Falso e a Profundidade é P50
4	SE o ângulo de fase é GI ENTÃO defeito é INTERNO é Verdadeiro, defeito EXTERNO é Falso e a Profundidade é P75
5	SE o ângulo de fase é MG ENTÃO a profundidade é P100
6	SE o ângulo de fase é GE ENTÃO defeito INTERNO é Falso, defeito EXTERNO é Verdadeiro e a Profundidade é P75
7	SE o ângulo de fase é M ENTÃO defeito INTERNO é Falso, defeito EXTERNO é Verdadeiro e a Profundidade é P50
8	SE o ângulo de fase é PE ENTÃO defeito INTERNO é Falso, defeito EXTERNO é Verdadeiro e a Profundidade é P25
9	SE o ângulo de fase é MPE ENTÃO defeito INTERNO é Falso, defeito EXTERNO é Verdadeiro e a Profundidade é P0

Tabela 7.7: Regras do subconjunto nebuloso Ab, Apt – LOC,EXT

Regra	Antecedente	Consequente
10	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é P e Amplitude é P	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
11	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é M e Amplitude é P	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
12	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é G e Amplitude é P	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
13	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é P e Amplitude é M	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
14	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é M e Amplitude é M	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
15	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é G e Amplitude é M	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
16	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é P e Amplitude é G	ENTÃO LOCALIZADO é Falso e EXTENSO é Verdadeiro
17	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é M e Amplitude é G	ENTÃO LOCALIZADO é Falso e EXTENSO é Verdadeiro
18	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é G e Amplitude é G	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
19	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é P e Amplitude é P	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
20	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é M e Amplitude é P	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
21	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é G e Amplitude é P	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
22	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é P e Amplitude é M	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
23	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é M e Amplitude é M	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
24	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é G e Amplitude é M	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
25	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é P e Amplitude é G	ENTÃO LOCALIZADO é Falso e EXTENSO é Verdadeiro
26	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é M e Amplitude é G	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
27	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é G e Amplitude é G	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
28	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é P e Amplitude é P	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
29	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é M e Amplitude é P	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
30	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é G e Amplitude é P	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
31	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é P e Amplitude é M	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
32	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é M e Amplitude é M	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
33	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é G e Amplitude é M	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
34	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é P e Amplitude é G	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
35	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é M e Amplitude é G	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso
36	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é G e Amplitude é G	ENTÃO LOCALIZADO é Verdadeiro e EXTENSO é Falso

Tabela 7.8: Regras do subconjunto nebuloso Apt – VOL

Regra	Antecedente	Consequente
37	SE Amplitude é MP	ENTÃO o Volume do defeito é VMP
38	SE Amplitude é P	ENTÃO o Volume do defeito é VP
39	SE Amplitude é M	ENTÃO o Volume do defeito é VM
40	SE Amplitude é G	ENTÃO o Volume do defeito é G
41	SE Amplitude é MG	ENTÃO o Volume do defeito é VMG

Tabela 7.9: Regras do subconjunto nebuloso Ab – PROFA,D

Regra	Antecedente	Consequente
42	SE Abertura 1 é MP, Abertura 2 é MP	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
43	SE Abertura 1 é MP, Abertura 2 é P	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
44	SE Abertura 1 é MP, Abertura 2 é M	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Verdadeiro
45	SE Abertura 1 é MP, Abertura 2 é G	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Verdadeiro
46	SE Abertura 1 é MP, Abertura 2 é MG	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Verdadeiro
47	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é MP	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
48	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é P	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
49	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é M	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
50	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é G	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Verdadeiro
51	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é MG	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Verdadeiro
52	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é MP	ENTÃO Profundidade Aumenta é Verdadeiro e Profundidade Diminui é Falso
53	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é P	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
54	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é M	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
55	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é G	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
56	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é MG	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Verdadeiro
57	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é MP	ENTÃO Profundidade Aumenta é Verdadeiro e Profundidade Diminui é Falso
58	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é P	ENTÃO Profundidade Aumenta é Verdadeiro e Profundidade Diminui é Falso
59	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é M	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
60	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é G	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
61	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é MG	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
61	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é MP	ENTÃO Profundidade Aumenta é Verdadeiro e Profundidade Diminui é Falso
63	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é P	ENTÃO Profundidade Aumenta é Verdadeiro e Profundidade Diminui é Falso
64	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é M	ENTÃO Profundidade Aumenta é Verdadeiro e Profundidade Diminui é Falso
64	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é G	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso
66	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é MG	ENTÃO Profundidade Aumenta é Falso e Profundidade Diminui é Falso

Tabela 7.10: Regras do subconjunto nebuloso Ab – SIM,ASSIM

Regra	Antecedente Conseqüente
67	SE Abertura 1 é MP, Abertura 2 é MP ENTÃO Defeito Simétrico é Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Falso
68	SE Abertura 1 é MP, Abertura 2 é P ENTÃO Defeito Simétrico é Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Falso
69	SE Abertura 1 é MP, Abertura 2 é M ENTÃO Defeito Simétrico é Falso e Defeito Assimétrico é Provavelmente Verdadeiro
70	SE Abertura 1 é MP, Abertura 2 é G ENTÃO Defeito Simétrico é Falso e Defeito Assimétrico é Verdadeiro
71	SE Abertura 1 é MP, Abertura 2 é MG ENTÃO Defeito Simétrico é Falso e Defeito Assimétrico é Verdadeiro
72	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é MP ENTÃO Defeito Simétrico é Provavelmente Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Falso
73	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é P ENTÃO Defeito Simétrico é Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Falso
74	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é M ENTÃO Defeito Simétrico é Provavelmente Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Falso
75	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é G ENTÃO Defeito Simétrico é Falso e Defeito Assimétrico é Provavelmente Verdadeiro
76	SE Abertura 1 é P, Abertura 2 é MG ENTÃO Defeito Simétrico é Falso e Defeito Assimétrico é Verdadeiro
77	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é MP ENTÃO Defeito Simétrico é Provavelmente Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Provavelmente Falso
78	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é P ENTÃO Defeito Simétrico é Provavelmente Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Provavelmente Falso
79	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é M ENTÃO Defeito Simétrico é Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Falso
80	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é G ENTÃO Defeito Simétrico é Provavelmente Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Falso
81	SE Abertura 1 é M, Abertura 2 é MG ENTÃO Defeito Simétrico é Falso e Defeito Assimétrico é Provavelmente Verdadeiro
82	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é MP ENTÃO Defeito Simétrico é Falso e Defeito Assimétrico é Provavelmente Verdadeiro
83	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é P ENTÃO Defeito Simétrico é Provavelmente Falso e Defeito Assimétrico é Provavelmente Verdadeiro
84	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é M ENTÃO Defeito Simétrico é Provavelmente Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Provavelmente Falso
85	SE Abertura 1 é G, Abertura 2 é G ENTÃO Defeito Simétrico é Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Falso
86	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é MG ENTÃO Defeito Simétrico é Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Falso
87	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é MP ENTÃO Defeito Simétrico é Falso e Defeito Assimétrico é Verdadeiro
88	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é P ENTÃO Defeito Simétrico é Falso e Defeito Assimétrico é Verdadeiro
89	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é M ENTÃO Defeito Simétrico é Falso e Defeito Assimétrico é Provavelmente Verdadeiro
90	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é G ENTÃO Defeito Simétrico é Provavelmente Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Falso
91	SE Abertura 1 é MG, Abertura 2 é MG ENTÃO Defeito Simétrico é Verdadeiro e Defeito Assimétrico é Falso

7.6 Seleção e Avaliação das Regras

A seleção das regras é feita considerando a aderência das entradas às declarações dos antecedentes. Para cada regra verifica-se a aderência de cada entrada. Caso não haja aderência a qualquer uma das entradas, a regra é excluída.

Em seguida, avalia-se o grau de pertinência dos antecedentes e dos consequentes de cada regra. Aplica-se a Regra do Mínimo de Mamdani para determinar a potência da consequência de cada regra.

7.7 Saídas do Sistema

Conforme já mencionado, o sistema possui como saída 6 decisões, sendo as quatro primeiras de classificação quanto à:

- Localização do defeito: INT / OUT;
- Extensão do defeito: LOC / EXT;
- Simetria do defeito: SIM / ASSIM;
- Forma do defeito: PROFA / PROFD; e,

as duas últimas quanto ao dimensionamento do defeito:

- Profundidade: PROF; e,
- Volume: VOL

A Figura 7.59 apresenta a saída do sistema quanto à profundidade dos defeitos com as funções de pertinência para Profundidade 0% a 100% (P0 a P100)

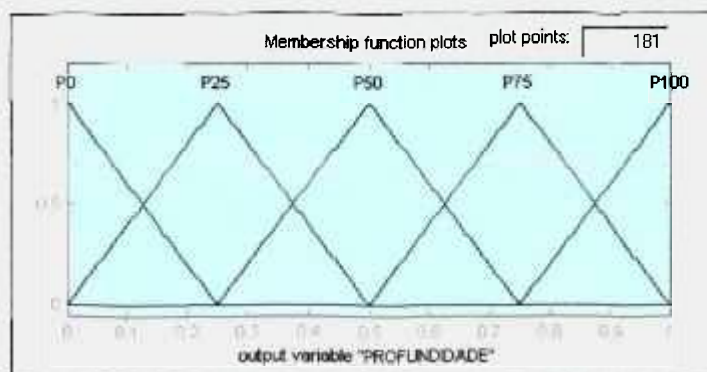


Figura 7.59: Funções da saída PROFUNDIDADE

A Figura 7.60 apresenta a saída do sistema quanto à decisão se o defeito é externo. As funções de pertinência para a decisão se o defeito é interno, localizado ou extenso, simétrico ou assimétrico e com profundidade aumentando ou diminuindo são semelhantes.

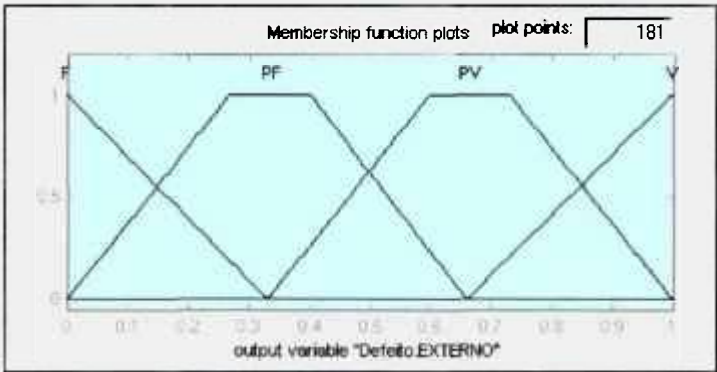


Figura 7.60: Funções da saída para Defeito EXTERNO

A Figura 7.61 apresenta a saída do sistema quanto à decisão do volume do defeito.

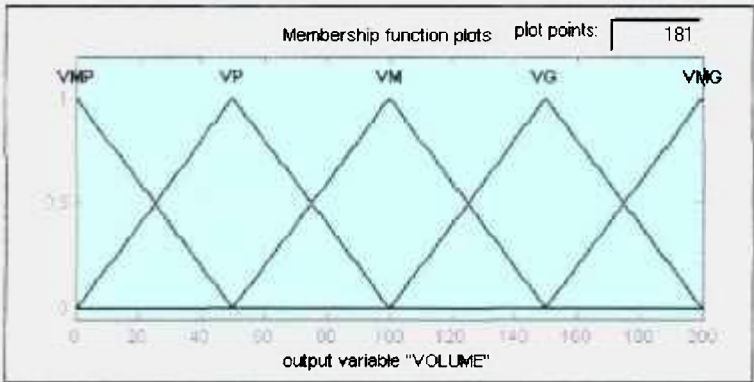


Figura 7.61: Funções de saída para VOLUME

7.8 Agregação

No processo de agregação, somam-se as potências das conseqüências das regras seleccionadas e avaliadas, ou seja, as funções de pertinência das saídas Fuzzy são somadas nos seus universos de discurso.

7.9 Desnebulização e decisão quanto à classificação e dimensionamento

Na etapa final realiza-se a desnebulização que consiste em determinar as saídas exatas para os conjuntos Fuzzy de saída, calculando-se o centróide da figura gerada no processo de agregação.

7.10 Verificação Metodológica

Concluído o treinamento supervisionado, a verificação da metodologia foi realizada utilizando as características extraídas do sinal do defeito N do tubo de Inconel 600 (InoxDid03), conforme apresentado na Figura 7.62.

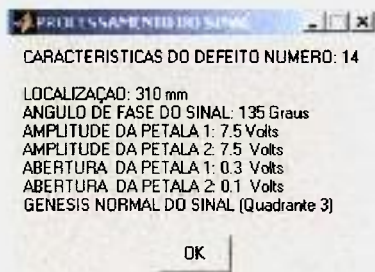


Figura 7.62: Extração das características do sinal do defeito N do tubo de Inconel 600

Esse defeito é um entalhe externo, simétrico, excêntrico, com profundidade máxima de 50% da espessura da parede do tubo. O seu volume é de aproximadamente 160 mm³, é um defeito extenso e a sua profundidade é constante ao longo do comprimento do tubo.

Na Figura 7.63 é apresentado graficamente todo o processo de análise da entrada Ângulo de Fase e as saídas do sistema, onde se observa que o defeito foi classificado corretamente como 0,89 EXTERNO.

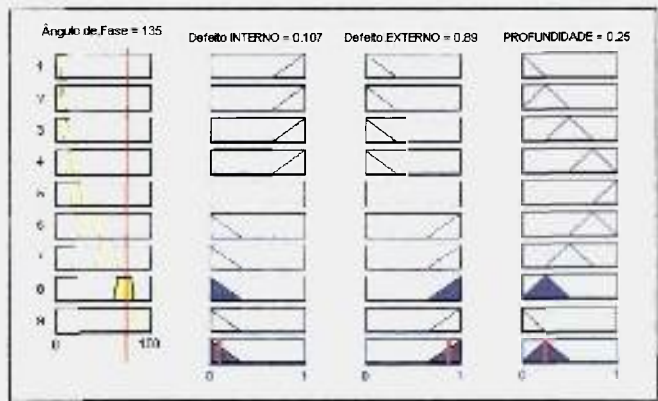


Figura 7.63: Classificação INTERNO / EXTERNO e determinação da PROFUNDIDADE

A profundidade determinada de 25% corresponde a uma profundidade média entre 0% e 50% da espessura da parede do tubo pois o defeito N do tubo de Inconel 600 é excêntrico e as sondas circunferenciais utilizadas fornecem um sinal equivalente a uma média da profundidade do defeito.

Na Figura 7.64 é apresentada a determinação do volume do defeito, ou seja, 150 mm³ para um defeito que tem 160 mm³.

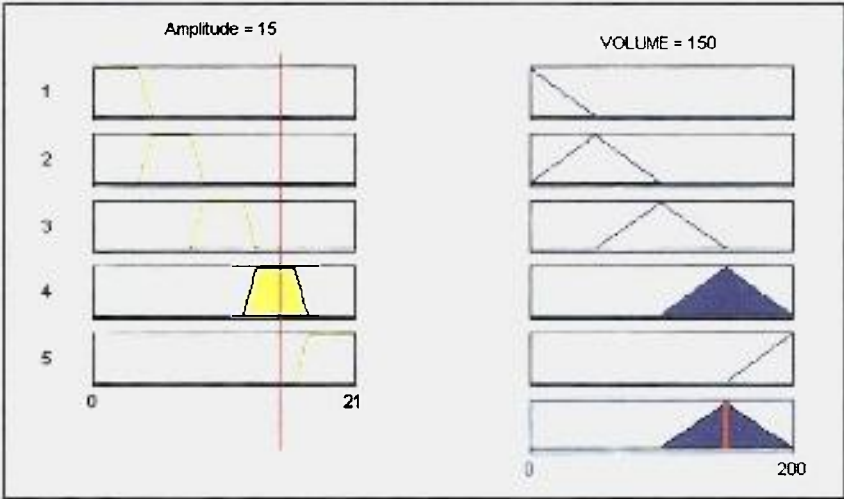


Figura 7.64: Determinação do VOLUME do defeito

Na Figura 7.65 é apresentada a classificação 0,89 EXTENSO para o defeito N do tubo de Inconel 600 que é efetivamente um defeito extenso.

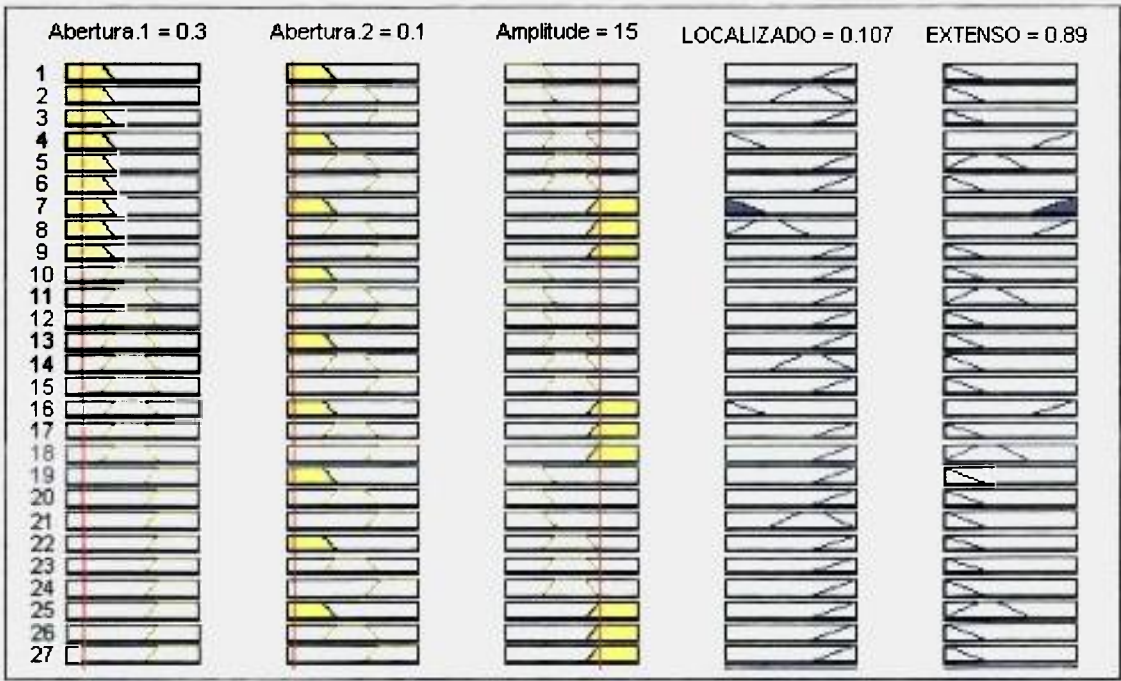


Figura 7.65: Classificação do defeito como LOCALIZADO ou EXTENSO

Na Figura 7.66 é apresentada a classificação correta do defeito N como 0,89 SIMÉTRICO.

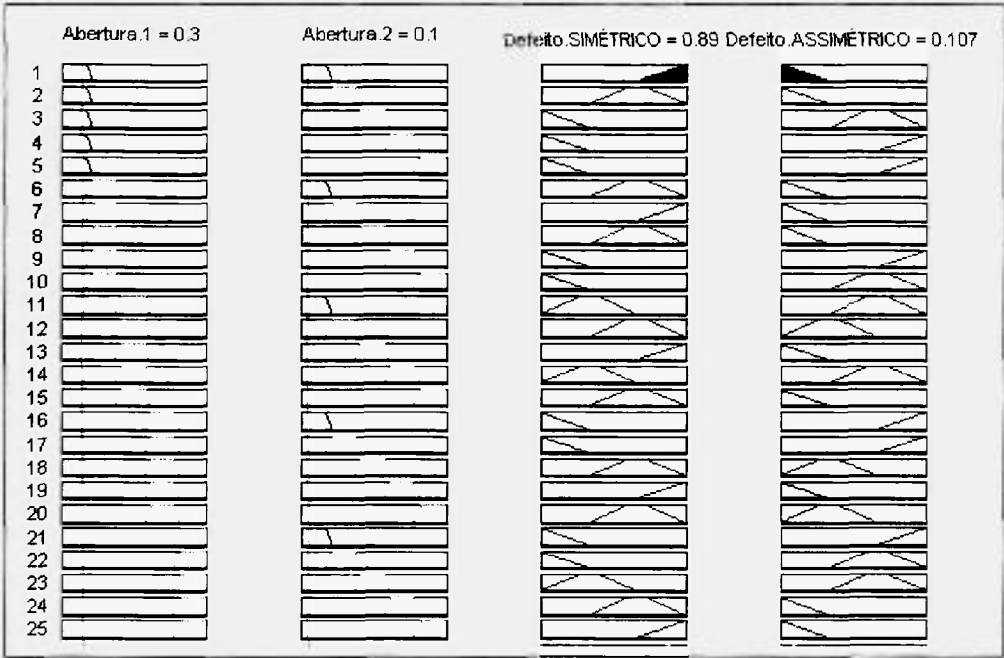


Figura 7.66: Classificação do defeito como SIMÉTRICO

Na Figura 7.67 houve uma classificação baixa (0,107) para a profundidade aumentando ou diminuindo pois o defeito tem profundidade constante.

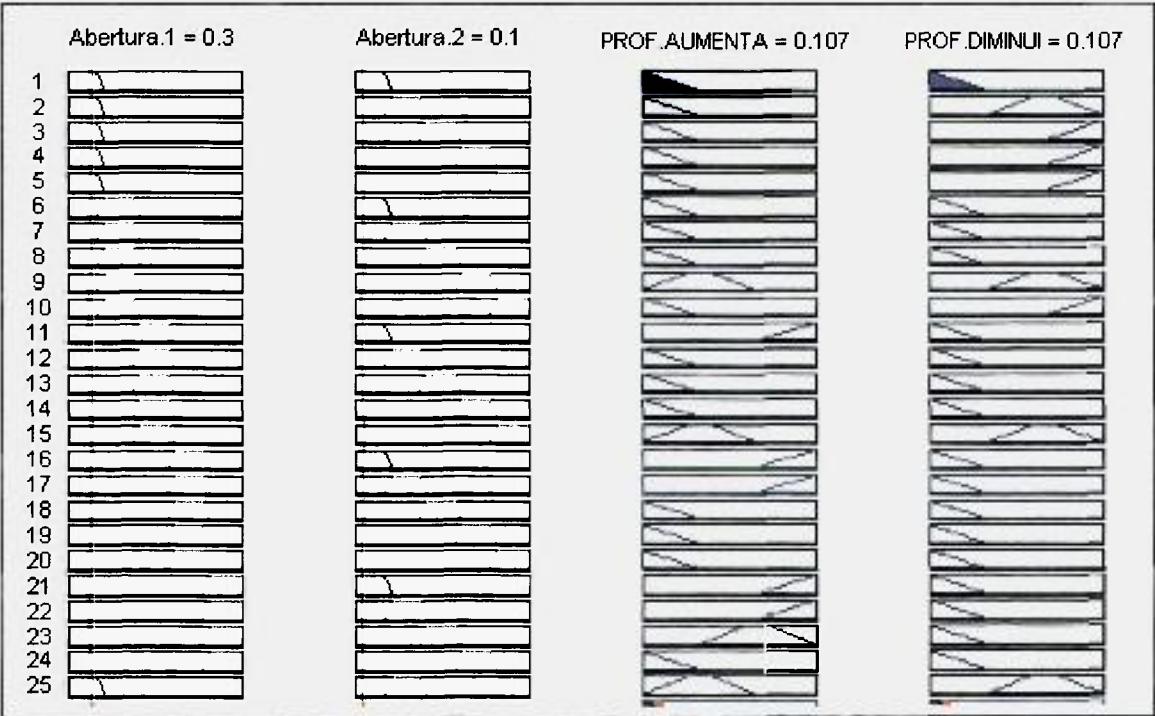


Figura 7.67: Classificação do defeito quanto à variação da PROFUNDIDADE

7.11 Resultados da aplicação do Sistema Fuzzy ao tubo de Inconel 600

O Sistema Fuzzy foi aplicado aos sinais dos 15 defeitos (de A a O) do tubo de Inconel 600 (InoxDid03, Figura 5.15).

Tal como exemplificado no item anterior para o defeito N, para cada um dos demais defeitos do tubo de Inconel 600 foram extraídas as características ângulo de fase, amplitude e aberturas. Essas características foram utilizadas como entradas do Sistema Fuzzy que classificou e dimensionou os defeitos conforme apresentado na Tabela 7.11, onde é relacionado o dado real do tubo com a respectiva decisão Fuzzy.

Tabela 7.11: Classificação e dimensionamento de defeitos pelo Sistema Fuzzy para o tubo de Inconel 600

Defeito	Classificação e dimensões reais / fornecidas pelo Sistema Fuzzy (Inconel 600)					
A	INT / 0.89INT	LOC / 0.97LOC	SIM / 0.97SIM	CTE / 0.03AUM-0.03DIM	P25 / P22	V20.4 / V19.0
B	INT / 0.96INT	LOC / 0.98LOC	SIM / 0.98SIM	CTE / 0.08AUM-0.08DIM	P50 / P48	V2.0 / V1.8
C	PASS / 0.50INT, 0.50OUT	LOC / 0.96LOC	SIM / 0.97SIM	CTE / 0.02AUM-0.02DIM	P100 / P99	V2.3 / V2.0
D	OUT / 0.89OUT	LOC / 0.95LOC	SIM / 0.96SIM	CTE / 0.07AUM-0.07DIM	P75 / P75	V7.0 / V6.7
E	OUT / 0.88OUT	LOC / 0.93LOC	SIM / 0.95SIM	CTE / 0.04AUM-0.04DIM	P50 / P43	V4.0 / V3.7
F	OUT / 0.96OUT	LOC / 0.97LOC	SIM / 0.98SIM	CTE / 0.05AUM-0.05DIM	P25 / P24	V12.5 / V12.0
G	OUT / 0.86OUT	LOC / 0.90LOC	SIM / 0.92SIM	CTE / 0.07AUM-0.07DIM	P75 / P70	V1.2 / V1.0
H	OUT / 0.80OUT	LOC / 0.89LOC	SIM / 0.90SIM	CTE / 0.09AUM-0.09DIM	P50 / P50	V1.7 / V1.6
I	OUT / 0.73OUT	LOC / 0.82LOC	SIM / 0.85SIM	CTE / 0.08AUM-0.08DIM	P25 / P23	V1.3 / V1.3
J	OUT / 0.97OUT	LOC / 0.95LOC	SIM / 0.98SIM	CTE / 0.04AUM-0.04DIM	P50 / P49	V9.9 / V9.7
K	OUT / 0.98OUT	LOC / 0.97LOC	ASSIM / 0.96ASSIM	DIM / 0.04AUM-0.96DIM	Pmax50 / P26	V5.2 / V5.0
L	OUT / 0.97OUT	LOC / 0.96LOC	ASSIM / 0.93ASSIM	DIM / 0.07AUM-0.93DIM	Pmax25 / P12	V2.6 / V2.4
M	OUT / 0.99OUT	EXT / 0.90EXT	SIM / 0.88SIM	CTE / 0.117AUM-0.117DIM	Pmax75 / P39	V230.0 / V220.0
N	OUT / 0.89OUT	EXT / 0.89EXT	SIM / 0.89SIM	CTE / 0.107AUM-0.107DIM	Pmax50 / P25	V160.0 / V150.0
O	OUT / 0.87OUT	EXT / 0.88EXT	SIM / 0.88SIM	CTE / 0.103AUM-0.103DIM	Pmax25 / P14	V150.0 / V145.0

INT: defeito interno do tubo

LOC: defeito localizado

ASSIM: defeito assimétrico

AUM: defeito cuja profundidade aumenta

P25 (típico): defeito com 25% de profundidade

Pmax75 (típico): defeito excêntrico com profundidade máxima de 75%

PASS: defeito passante

EXT: defeito extenso

CTE: defeito com profundidade constante

OUT: defeito externo do tubo

SIM: defeito simétrico

DIM: defeito cuja profundidade diminui

V50 (típico): defeito com 50 mm³ de volume

A seguir é apresentada a análise dos resultados fornecidos pelo Sistema Fuzzy quando aplicado a todos os defeitos do tubo de Inconel 600 e sumarizados na Tabela 7.11.

7.11.1 Classificação do defeito como interno ou externo (Inconel 600)

Os defeitos internos A e B foram classificados na média como 0,93 INT. Os defeitos externos C a O foram classificados na média como 0,90 OUT.

Para o defeito C (furo passante), o sistema Fuzzy forneceu a decisão 50% interno (0,50 INT) e 50% externo (0,50 OUT), o que é intrinsecamente correto.

Para os defeitos externos G, H e I, o sistema forneceu respectivamente 0,86 OUT, 0,80 OUT e 0,73 OUT. Essa discrepância deve-se ao pequeno volume desses defeitos (1,2 mm³, 1,7 mm³ e 1,3 mm³ respectivamente) e que resulta em sinais de pequena amplitude comprometendo o seu processamento.

7.11.2 Classificação do defeito como localizado ou extenso (Inconel 600)

O sistema classificou os defeitos localizados A a L com uma média de 0,94 LOC e os defeitos extensos M, N e O com uma média de 0,89 EXT.

7.11.3 Classificação do defeito como simétrico ou assimétrico (Inconel 600)

Com exceção dos defeitos K e L, todos os outros defeitos são simétricos e foram classificados com uma média de 0,93 SIM. Os defeitos assimétricos K e L foram classificados com uma média de 0,95 ASSIM.

7.11.4 Classificação da profundidade como constante, aumentando ou diminuindo

Para os defeitos com profundidade constante, a decisão média foi 0,07 AUM e 0,07 DIM, o que corresponde a 0,93 de média para profundidade constante CTE.

Para os defeitos K e L, cuja profundidade diminui, a decisão do sistema Fuzzy foi correta com uma média de 0,95 DIM.

7.11.5 Determinação da profundidade do defeito (Inconel 600)

Para defeitos concêntricos com profundidades 25% (A, F e I), 50% (B, E, H e J) e 75% (D e G), o Sistema Fuzzy determinou as profundidades médias de 23%, 48% e 73% respectivamente.

Para o furo passante, defeito C, o Sistema Fuzzy determinou a profundidade como 99% da espessura da parede do tubo.

Para o defeito excêntrico M, cuja profundidade máxima é 75% da espessura da parede do tubo, o sistema Fuzzy determinou a profundidade de 39%.

Para os defeitos excêntricos K e N, cuja profundidade máxima é 50% da espessura da parede do tubo, o sistema Fuzzy determinou a profundidade média de 26%.

Para os defeitos excêntricos L e O, cuja profundidade máxima é 25% da espessura da parede do tubo, o sistema Fuzzy determinou a profundidade média de 13%.

Os resultados apresentados para os defeitos excêntricos K, L, M, N e O devem-se ao fato da decisão Fuzzy ser baseada no conhecimento fornecido ao sistema que considera o sinal de um defeito excêntrico como a média do sinal do defeito ao longo do perímetro do tubo e, conseqüentemente, dimensiona a sua profundidade como aproximadamente metade da profundidade máxima. Essa é uma característica da inspeção por Eddy-Current quando são utilizadas sondas circunferenciais, como as utilizadas neste trabalho e que resulta na determinação de uma profundidade menor que a profundidade máxima do defeito. Essa situação é crítica pois leva a conseqüências contra a segurança. O problema da inspeção desse tipo de defeito é resolvido com a utilização de sondas dotadas de bobinas não coaxiais e que é proposto como um trabalho futuro.

7.11.6 Determinação do volume do defeito (Inconel 600)

O sistema Fuzzy determinou os volumes de todos os defeitos do tubo de Inconel 600 com uma média de $38,8 \text{ mm}^3$ enquanto que o valor médio real dos defeitos é $40,7 \text{ mm}^3$.

7.11.7 Conclusões da aplicação do Sistema Fuzzy ao tubo de Inconel 600

O Sistema Fuzzy apresentou um desempenho satisfatório, o que era esperado, visto que o treinamento supervisionado do sistema utilizou como universo de conhecimento informações extraídas das inspeções realizadas nos defeitos artificiais do próprio tubo de Inconel e nos defeitos artificiais produzidos nos tubos de aço inoxidável 316L e latão. Cabe ressaltar que o teste realizado comprova a funcionabilidade do sistema no domínio dos dados utilizados.

7.12 Resultados da aplicação do Sistema Fuzzy aos tubos InoxTroc

O Sistema Fuzzy foi aplicado às características extraídas dos sinais dos defeitos dos tubos InoxTroc01 a 06. Conforme já mencionado no Capítulo 5, esses tubos foram retirados de trocadores de calor que resfriavam ácido sulfúrico na superfície externa dos tubos com água de resfriamento pelo lado interno. O material dos tubos é ASTM A-249-316L e somente foi atacado pelo ácido. Portanto, somente a superfície externa dos tubos apresenta defeitos.

Primeiramente, nas Figuras 7.68 a 7.73, são apresentados os gráficos da reatância, da resistência e da impedância dos sinais originais desses tubos.

Em seguida, é apresentado na Figura 7.74 como exemplo típico, o pré-processamento realizado para os sinais de todos os defeitos do tubo InoxTroc02, cujo resultado pode ser comparado com os sinais originais (Figura 7.73).

A Figura 7.75 apresenta como exemplo típico, o pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoxTroc02.

Finalmente, é apresentado como exemplo típico na Figura 7.76, o processamento do sinal do defeito B desse mesmo tubo, com a sua localização e a extração das características ângulo de fase, amplitudes e aberturas.

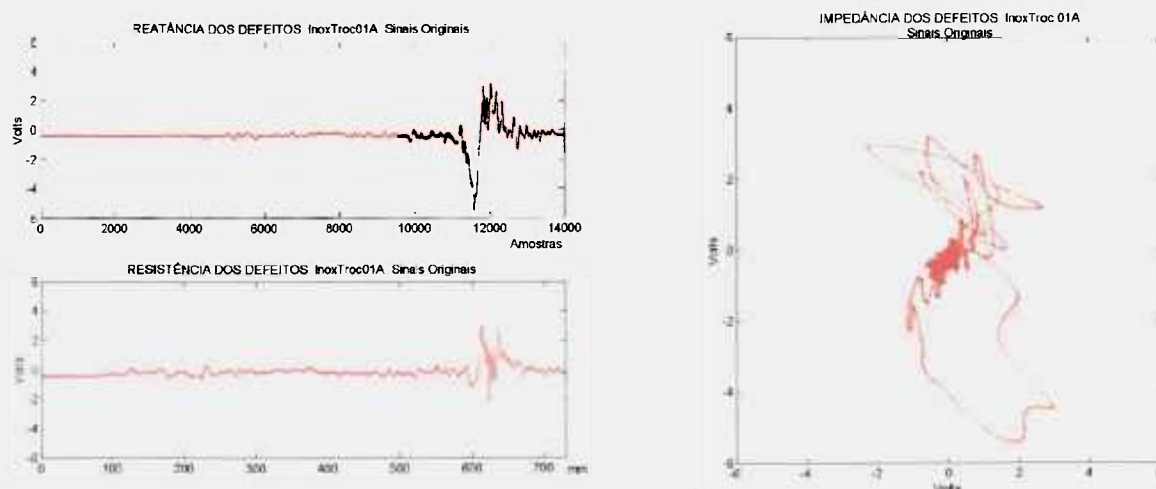


Figura 7.68: Sinais originais do tubo InoxTroc01

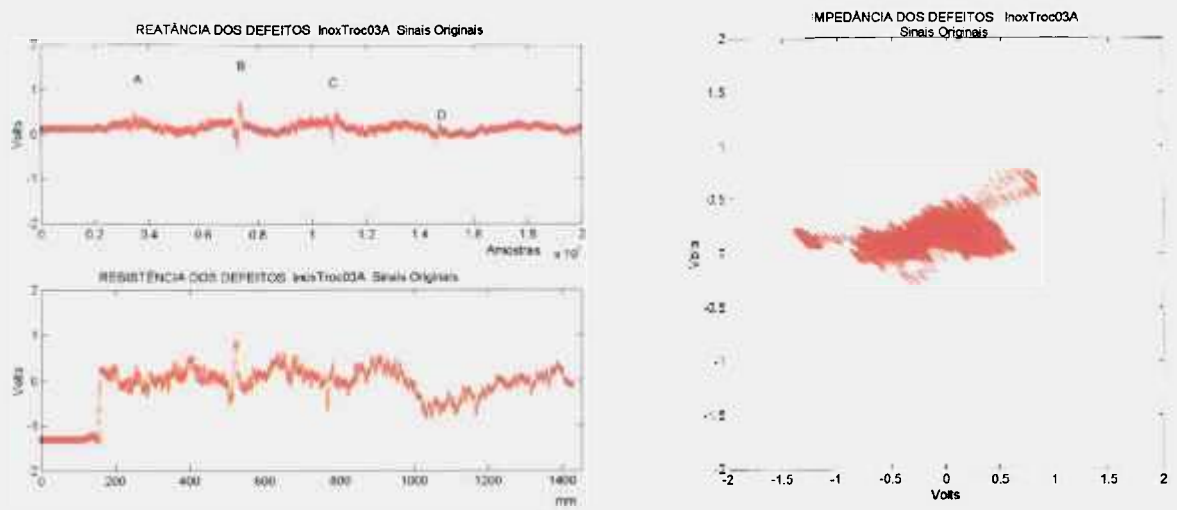


Figura 7.69: Sinais originais do tubo InoxTroc03

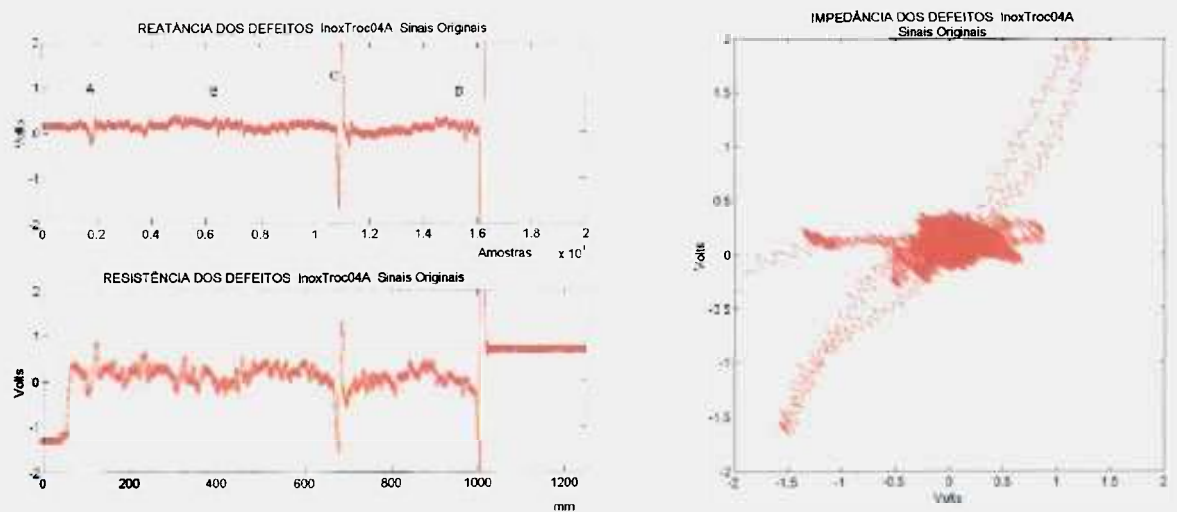


Figura 7.70: Sinais originais do tubo InoxTroc04

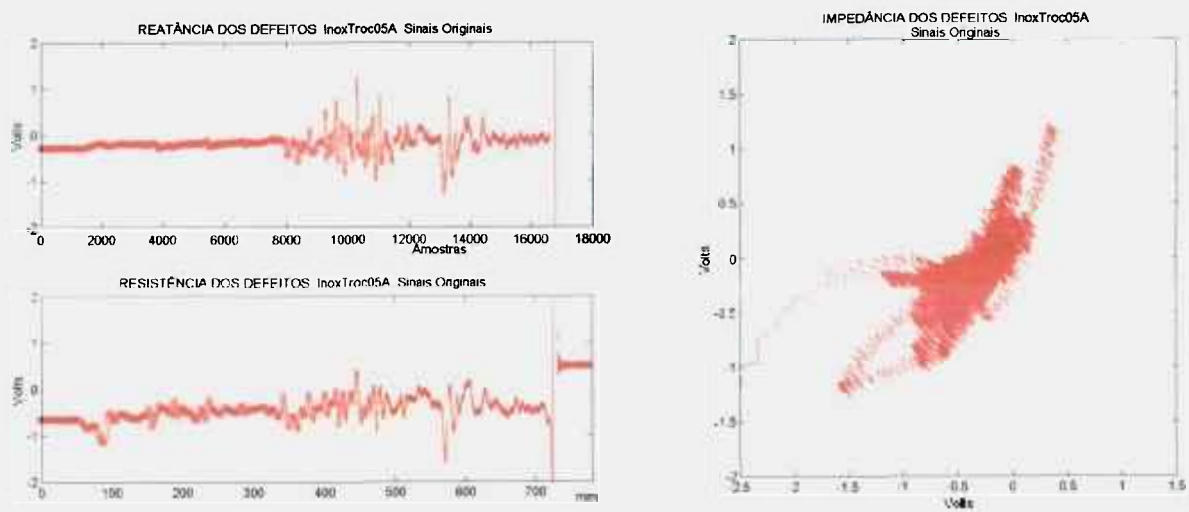


Figura 7.71: Sinais originais do tubo InoxTroc05

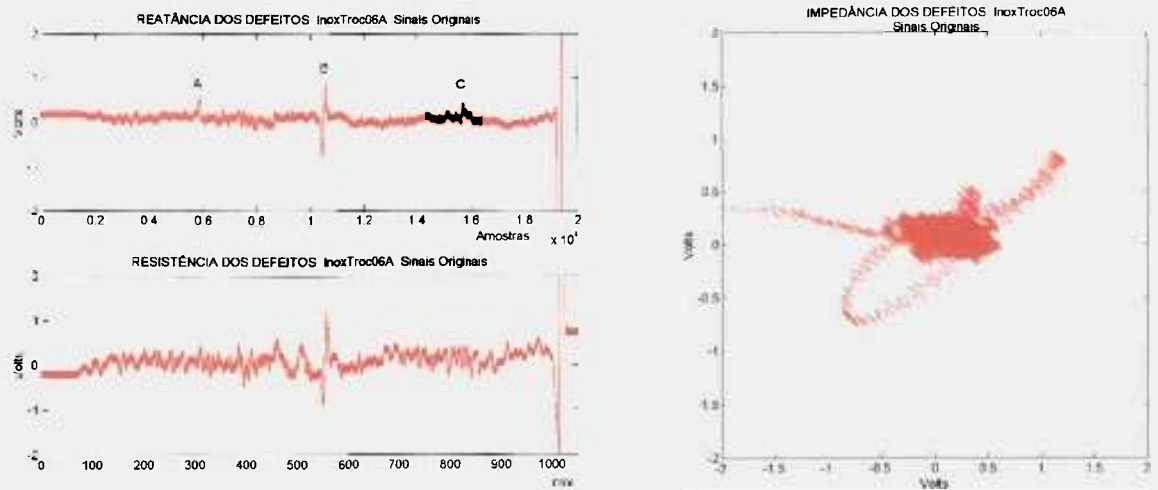


Figura 7.72: Sinais originais do tubo InoxTroc06

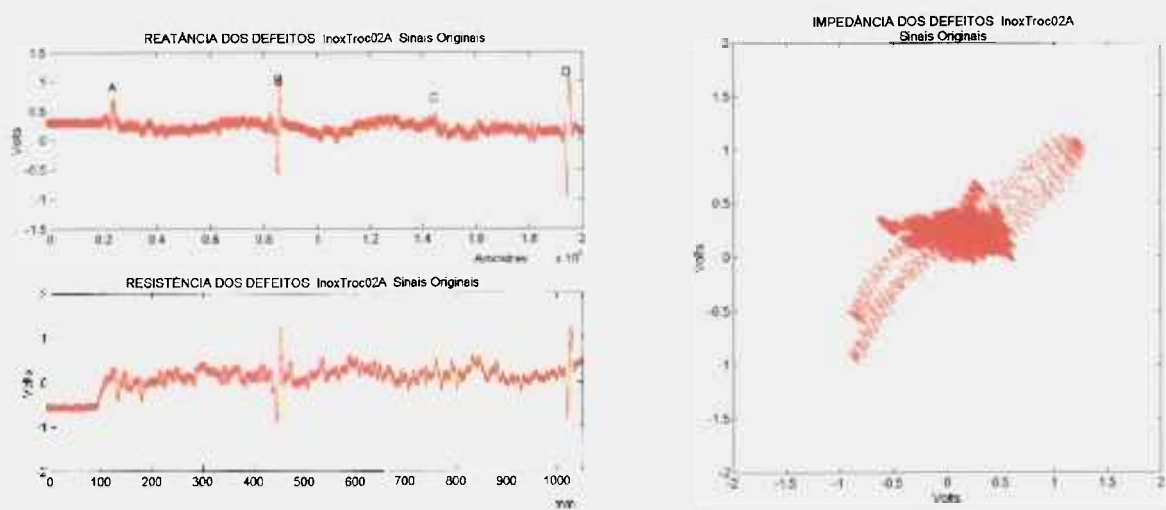


Figura 7.73: Sinais originais do tubo InoxTroc02

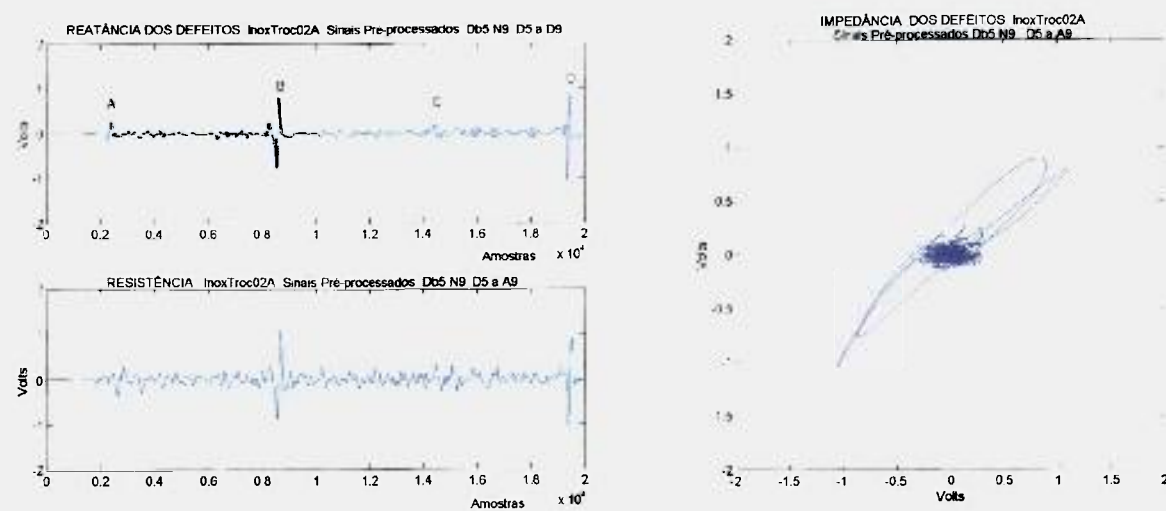


Figura 7.74: Sinais pré-processados do tubo InoxTroc02

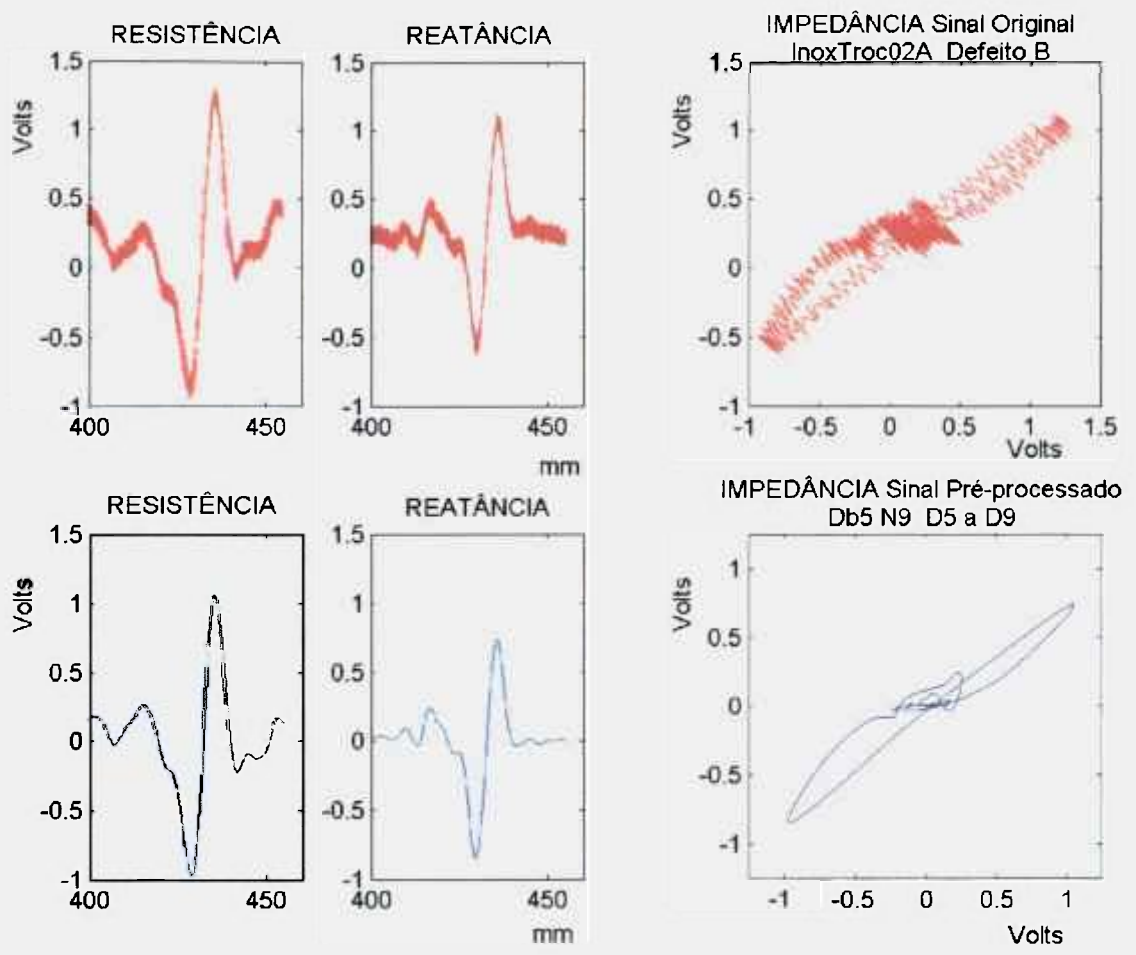


Figura 7.75: Pré-processamento do sinal do defeito B do tubo InoxTroc02

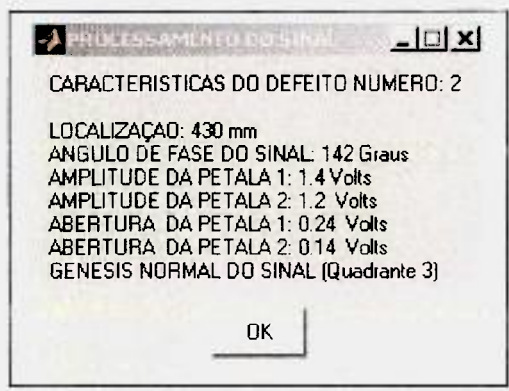


Figura 7.76: Extração de características do sinal do defeito B do tubo InoxTroc02

O procedimento de pré-processamento e processamento de sinais acima descrito e exemplificado para o defeito B do tubo InoxTroc02, foi realizado para todos os defeitos dos tubos InoxTroc01 a 06. As características extraídas dos sinais foram utilizadas pelo Sistema Fuzzy que classificou e dimensionou os defeitos. Os resultados são apresentados na Tabela 7.12 que relaciona os dados reais com as decisões Fuzzy.

Tabela 7.12: Classificação e dimensionamento de defeitos pelo Sistema Fuzzy para os tubos InoxTroc01 a 06

Tubo/ Defeito	Classificação e dimensões reais / fornecidas pelo Sistema Fuzzy (InoxTroc01 a 06)					
InoxTroc01 defeitos ^(a)	OUT / --	EXT / --	-- / --	DIM-CTE-AUM / --	P75 / --	~V800 / V --
InoxTroc02 Defeito A	OUT / 0.97OUT	LOC / 0.85LOC	~SIM / 0.81SIM	~CTE / 0.42AUM-0.42DIM	P03 / P04	~V0.3 / V0.2
InoxTroc02 Defeito B	OUT / 0.99OUT	LOC / 0.72LOC	~SIM / 0.90SIM	~CTE / 0.21AUM-0.21DIM	P23 / P24	~V0.8 / V0.7
InoxTroc02 Defeito C	OUT / 0.92OUT	LOC / 0.85LOC	~SIM / 0.88SIM	~CTE / 0.19AUM-0.19DIM	P02 / P02	~V0.2 / V0.1
InoxTroc02 Defeito D	OUT / 0.99OUT	LOC / 0.84LOC	~SIM / 0.92SIM	~CTE / 0.25AUM-0.25DIM	P28 / P30	~V1.2 / V1.1
InoxTroc03 Defeito A	OUT / 0.96OUT	LOC / 0.86LOC	~SIM / 0.83SIM	~CTE / 0.22AUM-0.22DIM	P17 / P16	~V0.9 / V0.8
InoxTroc03 Defeito B	OUT / 0.97OUT	LOC / 0.89LOC	~SIM / 0.85SIM	~CTE / 0.29AUM-0.29DIM	P20 / P20	~V1.3 / V1.2
InoxTroc03 Defeito C	OUT / 0.97OUT	LOC / 0.87LOC	~SIM / 0.84SIM	~CTE / 0.23AUM-0.23DIM	P18 / P18	~V1.0 / V1.0
InoxTroc03 Defeito D	OUT / 0.92OUT	LOC / 0.80LOC	~SIM / 0.81SIM	~CTE / 0.19AUM-0.19DIM	P11 / P12	~V0.7 / V0.6
InoxTroc04 Defeito A	OUT / 0.92OUT	LOC / 0.89LOC	~SIM / 0.83SIM	~CTE / 0.25AUM-0.25DIM	P13 / P15	~V0.5 / V0.4
InoxTroc04 Defeito B	OUT / 0.91OUT	LOC / 0.82LOC	~SIM / 0.80SIM	~CTE / 0.40AUM-0.40DIM	P04 / P05	~V0.4 / V0.3
InoxTroc04 Defeito C	OUT / 0.97OUT	LOC / 0.90LOC	~SIM / 0.86SIM	~CTE / 0.14AUM-0.14DIM	P39 / P40	~V1.8 / V1.7
InoxTroc04 Defeito D	OUT / 0.79OUT	LOC / 0.89LOC	~SIM / 0.88SIM	~CTE / 0.39AUM-0.39DIM	P02 / P03	~V0.2 / V0.1
InoxTroc05 defeitos ^(a)	OUT / ~0.86OUT	EXT / ~0.92LOC	-- / ~0.93ASSIM	DIM-CTE-AUM / 0.26AUM-0.26DIM	P70 / ~P73	~V600 / V8.9
InoxTroc06 Defeito A	OUT / 0.88OUT	LOC / 0.92LOC	~SIM / 0.79SIM	~CTE / 0.33AUM-0.33DIM	P13 / P16	~V0.2 / V0.1
InoxTroc06 Defeito B	OUT / 0.95OUT	LOC / 0.96LOC	~SIM / 0.82SIM	~CTE / 0.12AUM-0.12DIM	P29 / P31	~V1.1 / V1.0
InoxTroc06 Defeito C	OUT / 0.73OUT	LOC / 0.73LOC	~SIM / 0.68SIM	~CTE / 0.41AUM-0.41DIM	P02 / P04	~V0.7 / V0.5

INT: defeito interno do tubo

LOC: defeito localizado

ASSIM: defeito assimétrico

AUM: defeito cuja profundidade aumenta

P25 (típico): defeito com 25% de profundidade

defeitos^(a): corrosão generalizada

OUT: defeito externo do tubo

EXT: defeito extenso

CTE: defeito com profundidade constante

SIM: defeito simétrico

DIM: defeito cuja profundidade diminui

V50 (típico): defeito com 50 mm³ de volume

Nos próximos itens são apresentadas as conclusões referentes às 4 saídas de classificação e às 2 saídas de dimensionamento de defeitos pelo Sistema Fuzzy, relacionadas na Tabela 7.12, para os tubos InoxTroc01 a 06.

7.12.1 Classificação do defeito como interno ou externo (InoxTroc)

Todos os defeitos dos tubos InoxTroc02, 03, 04 e 06 foram classificados corretamente como externos com um índice médio de 0,92 OUT.

O Sistema Fuzzy não classificou os defeitos externos do tubo InoxTroc01 devido à impossibilidade de extração das características dos sinais pelo PPS, pois não foram geradas figuras de Lissajous com um formato de “8” que pudessem ser processadas, conforme apresentado no gráfico da impedância da Figura 7.68.

Os sinais apresentados na Figura 7.68 representam uma forte corrosão generalizada provocada pelo ácido sulfúrico na superfície externa do tubo de aço inoxidável 316L, conforme ilustrado na Figura 7.77. Para este tipo de defeito, é necessária a concepção de uma metodologia específica, o que é proposto como um trabalho futuro.



Figura 7.77: Corrosão do tubo InoxTroc01

O Sistema Fuzzy classificou corretamente os defeitos externos do tubo InoxTroc05 como $\sim 0,86$ OUT embora esse tubo também apresente corrosão generalizada, conforme apresentado nas Figuras 7.78 e 7.79.



Figura 7.78: Corrosão do tubo InoxTroc05 (trecho de 410 a 470 mm)



Figura 7.79: Corrosão do tubo InoxTroc05 (trecho de 550 a 610 mm)

O número de defeitos detectados no tubo InoxTroc05, através dos sinais apresentados na Figura 7.71, variou de 5 a 8 em função do pré-processamento, o que confirma a necessidade de uma metodologia específica para corrosão generalizada.

7.12.2 Classificação do defeito como localizado ou extenso (InoxTroc)

Os tubos InoxTroc02, 03, 04 e 06, que apresentam defeitos localizados, (Figura 7.80) foram classificados corretamente na média como 0,85 LOC.



Figura 7.80: Defeitos localizados típicos dos tubos InoxTroc02, 03, 04 e 06

A forte corrosão generalizada do tubo InoxTroc01 (Figura 7.77) não foi classificada pois não foram geradas figuras de Lissajous processáveis pelo PPS.

A corrosão generalizada e extensa do tubo InoxTroc05 foi classificada incorretamente na média como $\sim 0,92$ LOC devido à extração de características de 5 a 8 defeitos, conforme já mencionado, que foram classificados como localizados (LOC). Este tipo de defeito requer uma metodologia específica.

7.12.3 Classificação do defeito como simétrico ou assimétrico (InoxTroc)

Os defeitos aproximadamente simétricos dos tubos InoxTroc02, 03, 04 e 06 (Figura 7.80), foram classificados corretamente pelo Sistema Fuzzy com uma média de 0,83 SIM.

Os defeitos do tubo InoxTroc01 (forte corrosão generalizada) não foram classificados devido à não geração das figuras de Lissajous.

Os defeitos detectados do tubo InoxTroc05 (corrosão generalizada extensa) foram classificados como assimétricos (~0,93 ASSIM). Conforme apresentado nas Figuras 7.78 e 7.79, não é possível classificar estes defeitos como simétricos ou assimétricos. No entanto, o Sistema Fuzzy classificou esses defeitos como assimétricos devido às características extraídas dos 5 a 8 defeitos detectados.

7.12.4 Classificação da profundidade como constante, aumentando ou diminuindo

Os defeitos dos tubos InoxTroc02, 03, 04 e 06 foram classificados com índices variáveis para profundidade aumentando ou diminuindo apresentando uma média de 0,73 CTE. Os defeitos do tubo InoxTroc01 não foram classificados devido às figuras de Lissajous não serem processáveis pelo PPS. Os defeitos detectados do tubo InoxTroc05 levaram a uma determinação de 0,74 CTE. Estes resultados são discutíveis em vista da própria característica dos defeitos (Figuras 7.78 e 7.79) que não permitem uma classificação apropriada.

7.12.5 Determinação da profundidade do defeito (InoxTroc)

As profundidades dos defeitos dos tubos InoxTroc02 a 06 foram determinadas satisfatoriamente com uma média de 23% para os defeitos cuja profundidade média real é de aproximadamente 22%. Não foi possível determinar a profundidade dos defeitos do tubo InoxTroc01 (figuras de Lissajous não processáveis).

7.12.6 Determinação do volume do defeito (InoxTroc)

Para os defeitos do tubo InoxTroc01, que apresenta forte corrosão generalizada, o Sistema Fuzzy não determinou os volumes dos defeitos (figuras de Lissajous não processáveis). Para o tubo InoxTroc05, o volume determinado de aproximadamente $8,9 \text{ mm}^3$ corresponde apenas aos sinais dos 5 a 8 defeitos detectados, ficando muito distante do volume correto aproximado de 600 mm^3 , que foi determinado pelo balanço da massa removida pelo ataque do ácido.

7.12.7 Conclusões da aplicação do Sistema Fuzzy aos tubos InoxTroc

Com exceção do tubo InoxTroc01, o Sistema Fuzzy apresentou um bom desempenho na determinação da localização dos defeitos na superfície externa dos tubos e na determinação da profundidade.

Com exceção dos tubos InoxTroc01 e 05, o volume dos defeitos foi determinado satisfatoriamente.

A classificação dos defeitos como simétricos ou assimétricos e com profundidade aumentando, diminuindo ou constante para os tubos InoxTroc02, 03, 04 e 06 pode ser considerada apropriada considerando as características dos defeitos inspecionados.

Para o tubo InoxTroc01 não foi possível acionar o Sistema Fuzzy pois não foi possível processar os sinais pelo PPS e extrair características. A forte corrosão generalizada apresentada por este tubo requer uma metodologia específica.

Para o tubo InoxTroc05 o pré-processamento dos sinais visando a remoção dos ruídos RAS e RMT resultou em uma determinação de 5 a 8 defeitos no processamento pelo PPS. Esta variação deve-se ao fato do pré-processamento ser realizado manualmente e depender do executor. Determinados os defeitos, o Sistema Fuzzy apresentou decisões relacionadas apenas com as características extraídas dos defeitos. Assim, o volume determinado ($8,9 \text{ mm}^3$) refere-se apenas aos defeitos analisados.

Do acima exposto, pode-se concluir que o Sistema Fuzzy apresentou decisões apropriadas para os tubos InoxTroc que apresentam defeitos reais. Deve-se ressaltar que o sistema não foi treinado com dados de defeitos reais mas sim com o conhecimento adquirido em inspeções realizadas em tubos com defeitos artificiais.

8. CONCLUSÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

O ensaio não destrutivo por Eddy-Current é um tipo de inspeção bastante apropriado e extensivamente aplicado aos tubos dos Geradores de Vapor. É um método rápido e pouco oneroso, porém possui limitações na sua aplicação por apresentar grandes variações em função do ruído introduzido por alterações de materiais e interferências do meio, bem como depender sobremaneira da sensibilidade dos inspetores no processo de interpretação dos sinais dos defeitos.

Esta peculiaridade é comprovada pela inexistência de critérios normalizados para decisão, com exceção do ângulo de fase, para o qual o ASME estabelece valores para os defeitos do tubo padrão, espalhamento dos sinais, formação das pétalas e amplitude do sinal na tela.

A ausência de uma normalização que, em última instância, é uma consequência da própria subjetividade na inspeção, cria uma condição propícia ao tamponamento desnecessário de tubos em nome de uma margem de segurança que, na realidade, é resultante do desconhecimento sobre a remoção padronizada do ruído. Por outro lado, esse mesmo desconhecimento leva à não detecção ou dimensionamento não apropriado de defeitos como, por exemplo, quando o laudo de uma inspeção apresenta que as dimensões de um defeito são menores que as reais. Em vista do exposto, é evidente a necessidade de auxiliar os inspetores no seu difícil trabalho de interpretação de sinais.

Não seria possível desempenhar tal papel sem conhecer a fundo a técnica de inspeção por Eddy-Current, que é um dos objetivos deste trabalho, e que foi alcançado plenamente através de estudos teóricos e experimentais, além dos contatos desenvolvidos com a ABENDE e com empresas especializadas no assunto tais como a Brasitest e a Interativa. A participação *in situ* de campanhas de inspeção dos Geradores de Vapor da Usina Nuclear de Angra I, durante as paradas para recarga do núcleo, interagindo com os maiores especialistas a nível mundial na técnica das correntes parasitas, também foi fundamental para obter-se uma visão real e atual do problema. A autonomia no domínio da inspeção por Eddy-Current foi atingida com a aquisição do aparelho de inspeção MIZ-17ET, sondas, interface com o sistema de aquisição de dados e a implementação de uma bancada experimental com sua efetiva utilização.

Foram produzidos padrões de inspeção e tubos com defeitos artificiais em latão, aço inox 316 L e Inconel 600, sendo este último o mesmo tubo utilizado na Usina Nuclear de Angra I. Foram também obtidos tubos de inox 316L com defeitos reais e extraídos de trocadores de calor.

A partir desse ponto, com a base experimental concluída, todos os tubos disponíveis foram inspecionados, em diversas condições, gerando um base de dados sólida e composta de mais de uma centena de arquivos de sinais de Eddy-Current que foram lidos e visualizados por um programa especialmente desenvolvido para esse fim (MLV).

A análise dos sinais adquiridos revelou a presença do Ruído de Aquisição do Sinal (RAS) e do Efeito “Lift-off” que foram removidos em um processo de pré-processamento de sinais com Transformadas de Wavelets que é uma técnica eficaz e relativamente recente. Concluiu-se que, com exceção da TW Haar, as TW’s das famílias Daubechies, Symlet e Biortogonal podem ser utilizadas eficazmente no processo de remoção desses dois ruídos desde que a ordem da transformada seja maior que 5.

Os sinais revelaram também a presença do Ruído do Material (RMT) que, ao contrário dos ruídos já mencionados, não é de remoção simples. Para o seu pré-processamento também foram utilizadas Transformadas de Wavelets por uma técnica original, proposta neste trabalho e que consiste em reconstruir os sinais por meio da seleção dos coeficientes das decomposições em frequência das componentes da reatância e da resistência do sinal original que melhor traduzem o tipo de defeito focalizado. Esta etapa do trabalho confirmou a importância do domínio da relação defeito-sinal que só foi obtida através da análise da base experimental disponível.

O processamento dos sinais pré-processados justificou a necessidade de desenvolver o Programa de Processamento de Sinais (PPS) para automatização do processo de detecção, localização e extração de características dos sinais pois a existência de mais de 100 arquivos com uma média de 9 defeitos por arquivo eleva a quase 1000 o número de análises. Esta situação faz parte do trabalho diário do inspetor de Eddy-Current que deve analisar uma grande quantidade de sinais de alguns milhares de tubos com mais de 10 metros de comprimento, no menor espaço de tempo possível (alguns dias) visto que a planta está parada. O PPS foi concebido visando a sua utilização por inspetores colaboradores e em pesquisas futuras.

No processamento foram propostos e utilizados critérios para a leitura de características das figuras de Lissajous, que poderão ser utilizados em futuras normalizações, visto que o código ASME é incompleto nessa matéria. Também foi proposta a extração de novas características das figuras de Lissajous (amplitudes e aberturas), relacionadas com a sua forma, que permitem a exploração da relação entre as características dos sinais e dos defeitos, organizando metodologicamente o conhecimento disponível sobre a inspeção por Eddy-Current de defeitos volumétricos.

O conhecimento adquirido com o processamento de sinais foi transferido para a Base de Conhecimento de um sistema de inferência baseado em lógica Fuzzy que relaciona as características dos sinais com extensão, forma, localização e profundidade de defeitos volumétricos. O Sistema Fuzzy foi testado para o tubo de Inconel 600 e para os tubos InoxTroc extraídos de trocadores de calor e apresentou resultados satisfatórios.

O objetivo principal deste trabalho, ou seja, a formulação de uma metodologia aplicável aos sinais de inspeções por Eddy-Current em defeitos volumétricos, que reduza a subjetividade no processo de decisão do inspetor, foi atingido. Esta metodologia traduz o conhecimento adquirido com a base de dados pesquisada e poderá evoluir com melhorias na Base de Conhecimento do Sistema Fuzzy, integração automática do Pré-processamento, do Processamento e do Sistema Fuzzy e, finalmente, a extensão da metodologia para defeitos não volumétricos como IGA e defeitos localizados sob chicanas e espelhos.

Além desses, também são propostos os seguintes trabalhos futuros:

- Utilização da Análise por Pacotes de Wavelets, conforme abordado no item 6.3;
- Fuzzificação do processo de transformação da figura de Lissajous no pré-processamento do sinal, conforme proposto no item 6.4.2 (RMT);
- Obtenção de uma relação geral para os diversos códigos de coeficientes de um tubo para a remoção do RMT, por meio de técnicas de inteligência artificial, conforme proposto no item 6.4.2.3;
- Determinação do início, do fim e do comprimento real do defeito, considerando a interação entre o campo magnético gerado pela bobina da sonda e o defeito, conforme item 7.2.4;

- Avaliação da melhor forma de leitura do ângulo de fase, ou seja, através da reta que une as Pernas P2 e P3 ou da reta que une as extremidades da figura de Lissajous, conforme abordado no item 7.2.5.1;
- Extensão da metodologia para defeitos causados por corrosão intergranular e corrosão generalizada; e,
- Utilização de sondas com bobinas não coaxiais para a exploração de defeitos circunferenciais excêntricos, conforme proposto no item 7.11.5.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Metals – *ASM Handbook Vol. 17 – Non-Destructive Examination – Metals Handbook*, 9th ed., 1989.

American Society of Mechanical Engineers- *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V*, 1992.

Atomic Energy of Canada Ltd. Chalk River Labs., *Steam Generator Newsletter N. 27*, 1996, may-june.

Bartonicek J., Jonas O., Schoeckle F.: *Quantification of the Safety Status of PWR Generators, Conference on Steam Generators and Heat Exchangers*, Toronto, Canada, 1996

Blomgren, J. C.: *Steam Generator Performance Worldwide*. Steam Generator and Heat Exchanger Conference. Toronto, 1990, Paper N° 1.

Carter, A. D. S.: *Reliability Reviewed*, Proc. Instn. Mech. Engineers, vol 193, 81-92, 1979.

Carelli, et al.: *Proceedings of ICONE 10*, 10th International Conference on Nuclear Engineering, Arlington, VA, April 14-18, 2002.

Chen, G., Yamaguchi, A., Miya, K.: *A Novel Signal Processing Technique for Eddy-Current Testing of Steam Generator Tubes*, IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 34, N° 3, May 1998.

Daubechies, I.: *Ten Lectures on Wavelets*, CBMS-NSF Series in Applied Mathematics, 1988.

Dow, B. L. Jr.: *Steam Generator Progress Report*, revision 5, EPRI, 1989.

Erbay A. S., Upadhyaya B. R. : *A Personal Computer-Based On-Line Signal Validation System for Nuclear Power Plants*, Nuclear Technology, Vol. 119, July, 1997, 63-75.

Förster, F.: *Inductive Methods*, Section D in E. Siebel Handbook Material Testing I, Springer-Verlag, 1958.

General Dynamics, Nondestructive Testing, *Classroom Training Handbook*, EC Testing, 1967.

Grman, J., Ravas, R., Syrová, L.: *Application of Wavelet Transformation in Eddy-Current Testing of Steam Generator Tubes*, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, Hungary, May 21-23, 2001.

Ikonomopoulos, A., Tsoukalas L. H., Uhrig R. E.: *Integration of Neural Networks with Fuzzy Reasoning for Measuring Operational Parameters in a Nuclear Reactor*, Nuclear Technology, Vol. 104, pp 1-11, Oct. 1993.

International Atomic Energy Agency: *Interregional Training Course on Ageing Phenomena and Diagnostics for PWR - Type Reactors*, Nov. 25 - Dec. 13 / 1996.

Jones, R. H., Ricker, R. E.: *Stress-Corrosion Cracking*, ASM Handbook, April 1998, pg. 145-162.

Joubert, P. -Y., Bihan Le, Y., Placko, D.: *Localization of defects in steam generator tubes using a multi-coil eddy current probe dedicated to high speed inspection*, NDT&E International, 2001.

Kalman, R. E.: *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, J. Basic Eng., 82, 1960.

Kriesis, E. E., Tsiboukis, T. D., Panas, S. M., Tegopoulos, J. A.: *Eddy Currents: Theory and Applications*, Proceedings of the IEEE, vol. 80, N° 10, October, 1992.

Levy, A. J., Oppenlander J. E., Brudnoy, D. M.: Dodger: *An Expert System for Eddy-Current Evaluation*, Materials Evaluation, vol. 51, p34, 1993.

Lippmann, R. P.: *An Introduction to Computing with Neural Nets*, IEEE ASSP Magazine, Vol. 4, No. 2, pp 4-22, April 1987.

Li, L., Tsukada, K., Hanasaki, K., Zeng, L.: *Fusion of Multi-Frequency Eddy Current Signals by Using Wavelet Analysis Method*, ISIF, 2002.

Lopez, L. A. N. M.: *Concepção e Simulação Estática do Circuito Secundário de Usinas Nucleares de Pequena Potência*, 1989. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Lopez, L. A. N. M.: *Relatório Semestral do Programa de Pós Graduação do IPEN*, 1º Trimestre de 2001.

Mallat, S. G.: *A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. Vol. 11, pp. 674-693, July 1989.

Matlab – *Versão do Estudante* – Versão 4, The Math Works Inc., Makron Books, 1997.

MIZ-17ET Eddy Current Test Instrument, *Operating Guide*, Zetec, August 2000.

Morettin, P. A., *Ondas e Ondaletas*, Edusp, 1996.

Odar S., Bouecke R.: *Strategies for Steam Generator Design, Operation and Lifetime Extension*. Siemens AG, Power Generation Group KWU.1996.

Reifman, J.: *Survey of Artificial Intelligence Methods for Detection and Identification of Component Faults in Nuclear Power Plants*, Nuclear Technology, Vol. 119, July 1997.

Rozenfeld, I. L.: *Corrosion Inhibitors*, Mc Graw-Hill International Book Company, pg. 5-85, 1981.

Rumelhart, D., McClelland, J.: *Paralleled Distributed Processing*, Vol. 2 Bradford Books/MIT Press, Cambridge, MA, 1986.

Simpson, P. K.: *Artificial Neural Systems*, Pergamon Press, New York, 1990.

Silva, A. A., Upadhyaya B. R.: *Theory of Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, Report Number EPRI/UTNE/AAS/97-01, 1997.

da Silveira, E. C. K.: *Análise de Integridade Estrutural de Tubos de Geradores de Vapor Deteriorados por Corrosão sob Tensão pelo Primário na Região de Transição de Expansão Junto ao Espelho*, 2002. Dissertação de Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo

Simulink – *User's Guide* – The Math Works Inc., Makron Books, 1998..

Steam Generator Eddy-Current Data Analysis Performance Demonstration Review Material EPRI NDE Center Eddy-Current Testing Review Material, p. 6-1, October, 1995.

Steam, Its Generation and Use, Babcock & Wilcox, 1978.

Stegemann, D., Reimche W., Feiste K. L., Heutling B.: *Characterization of Materials Behavior by Electromagnetic Nondestructive Testing*. Anais do MARCON 1997, Knoxville, Tennessee, 87.01 – 87. 09.

Stegemann, D.: *Avanços Tecnológicos em END por Correntes Parasitas*, Revista dos END, 1986, 23-29.

Steinberg, B. Z., Leviatan, Y.: *On the Use of Wavelet Expansions in the Method of Moments*, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol. 41, No. 5, May 1993.

Stellwag, B., Wieling, N., Stieding, L.: *Corrosion Resistance of SG Tubing Materials Alloy 800 and Alloy 690*, Kraftwerk Union, AG, 1987.

Tsoukalas L. H., Uhrig R. E.: *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*, John E. Wiley & Sons, New York, NY, 1997.

Uhrig, R. E.: *Final Report prepared for Electric Power Research Institute, EPRI RP-8010012*, 1993.

Upadhyaya, B. R., Hooper, W., Yan, H., Behraves, M. M., Henry G.: *Advances in Information Processing in Eddy Current Diagnostics of Steam Generator Tubing*, Anais do MARCON 97, Knoxville, Tennessee, 85.01 – 85.13.

Upadhyaya, B., Eryurek, E.: *Application of Neural Networks for Sensor Validation and Plant Monitoring*, Nuclear Technology, Vol. 97, pp. 170-176, 1992.

Upadhyaya, B. R., da Silva, D., Hooper, W. C.: *Eddy-Current Test Data Analysis for Steam Generator Tubing Diagnosis*, Nuclear Engineering Department of The University of Tennessee, EPRI, 1997.

Upadhyaya, B. R., Hooper, W. C.: *An Automated Diagnostics System for Eddy-Current Data Analysis of Steam Generator Tubing*, Annual Report EPRI, 1998.

Upadhyaya, B. R., Erbay, A. S., Hazi, G., Sung, K.Y.: *Eddy Current Test Data Analysis for Steam Generator Tubing Diagnosis Using Artificial Intelligence Methods*, Annual Report, EPRI, 1999.

Whyatt P., Horrocks P., Mills L.: *Steam Generator Reliability - Implications for APWR Codes and Standards*. Nuclear Energy, 1995, 34, n. 4, Aug., 217-228

Wilson, B., Solomon, A. A., Tsoukalas, L. H.: *Plant Life Extension Through Neurofuzzy Analysis of Steam Generator Performance* – Purdue University, School of Nuclear Engineering, 1998.

Yan, W., Upadhyaya, B. R., Behraves, M. M., Henry, G.: *Artificial Intelligence-Based Decision Methods for Diagnostics of Steam Generator Tubing*, Prodeedings of the 9th Power Plant Dynamics, Control and Testing Symposium, May 1995.

Yan, W., Upadhyaya, B. R.: *Development of an Automated Diagnostics System for Eddy-Current Analysis Using Applied Artificial Intelligence Techniques*, Research Report, EPRI/UTNE/93-09, p. 13, February 1996.

Zadeh L. A.: *Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-3, N° 1, January 1973.

Zadeh L. A.: *Fuzzy Algorithm*, Informat. Control. Vol. 12, 1968.

Zadeh L. A.: *Fuzzy Sets*, Informat. Control. Vol. 8, 1965.