

# Desenvolvimento de Técnicas de Detecção de Incrustação Utilizando Métodos Não-invasivos

Jaidilson Jó da Silva

Tese submetida à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Processamento da Informação

José Sérgio da Rocha Neto, D.Sc.  
Orientador

Antonio Marcus Nogueira Lima, Dr.  
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil  
© Jaidilson Jó da Silva, Dezembro de 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586d

2008 Silva, Jaidilson Jó da

Desenvolvimento de técnicas de detecção de incrustação utilizando métodos não-invasivos / Jaidilson Jó da Silva.— Campina Grande, 2008.

166 f.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. José Sérgio da Rocha Neto e Prof. Dr. Antonio Marcus Nogueira Lima.

1. Engenharia Elétrica 2. Detecção 3. Incrustação 4. Métodos Não-Invasivos I. Título.

CDU – 621.3(043)

UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I	
4374	04-05-09

**DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE INCRUSTAÇÃO  
UTILIZANDO MÉTODOS NÃO-INVASIVOS**

**JAIDILSON JÓ DA SILVA**

Tese Aprovada em 22.12.2008

  
**JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.Sc., UFCG**  
**Orientador**

  
**ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG**  
**Orientador**

  
**EDVAL JOSÉ PINHEIRO SANTOS, Dr., UFPE**  
**Componente da Banca**

  
**AMAURI OLIVEIRA, D.Sc., UFBA**  
**Componente da Banca**

  
**FRANZ HELMUT NEFF, Dr., UFCG**  
**Componente da Banca**

  
**PÉRICLES REZENDE BARROS, Ph.D., UFCG**  
**Componente da Banca**

**CAMPINA GRANDE – PB**  
**DEZEMBRO - 2008**

# Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Odete Jó e João Antonio, aos meus irmãos, Jaidete, Jainete e João Paulo, a minha esposa Glória e ao meu filho, Matheus, presente de Deus. A eles dedico com amor.

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter sempre me iluminado.

Aos meus pais, Odete e João Antonio, por minha vida e por todo o apoio.

Aos meus irmãos, Jaidete, Jainete e João Paulo, pelo incentivo e pela força.

A minha esposa, Glória, pela paciência e dedicação.

Ao meu filho, Matheus, pelos momentos de alegria e descontração.

Aos professores José Sérgio, Antonio Marcos e Helmut Neff pela orientação e ajuda, sem a qual este trabalho não seria realizado.

Aos membros da banca, professores Péricles, Edval, Amauri e Neff pelas críticas e sugestões referentes ao trabalho realizado.

Aos amigos, de forma especial a Kleber Melo, Carlos Alberto, Júlio César, Thiago Alberto, Hamurabi, Marcos Aurélio, Jucelino e Tatiana pelo apoio incondicional.

Aos amigos de laboratório, Jadsonlee, Alfranque, Walter, Walber, Jefferson, Fabio e Simões pelo companheirismo e incentivo.

Ao pessoal do EMBEDDED e LIEC e aos funcionários da COPELE pelo apoio recebido.

Ao CNPq, pela bolsa de pesquisa.

Bem como, a todos que contribuíram de forma direta e indireta para realização deste trabalho.

Agradeço a todos.

# Resumo

Neste trabalho apresentam-se as técnicas desenvolvidas para detecção de incrustação em dutos utilizando métodos não-invasivos. A incrustação é um problema que ocorre nas indústrias química, petrolífera, alimentícia e farmacêutica. Este processo consiste na deposição de materiais orgânicos pesados e de outros sólidos dissolvidos ou em suspensão no sistema de transporte fluídico. Com os problemas causados pela incrustação surge a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas de detecção.

A primeira técnica proposta baseia-se na estimação de parâmetros (com o modelo de pulsos Gaussianos) de um sistema que utiliza ondas guiadas para detecção de incrustação em tubulações. Com o modelo utilizado, as modificações dos parâmetros estimados são analisadas, quando a incrustação está presente nas tubulações monitoradas.

A segunda técnica proposta baseia-se na utilização da transformada Wavelet (Ondaleta), que é uma técnica de análise de sinais através da combinação linear de funções elementares. Enquanto a transformada de Fourier utiliza uma série de exponenciais complexas de diferentes frequências, a transformada Wavelet utiliza funções que são versões escalonadas e transladadas de uma função modelo conhecida como Wavelet mãe. Com o uso de Wavelets pode-se analisar a distribuição de energia do sinal com a mudança do tempo em diferentes faixas de frequência. Com isso, a transformada Wavelet é utilizada para analisar os sinais ultra-sônicos para detecção de incrustação em tubulações. As energias dos coeficientes Wavelet dos sinais ultra-sônicos foram determinadas e as modificações nestas energias foram observadas quando a incrustação está presente na tubulação.

A terceira técnica proposta baseia-se na análise de vibrações, com o uso do impacto do martelo. As vibrações são detectadas por um acelerômetro ou microfone, permitindo a normalização da resposta da vibração medida, para encontrar as funções de resposta do sinal. Testes com impacto do martelo têm sido usados em muitas áreas da engenharia para analisar funções de resposta em frequência (FRF) devido a sua conveniência e simplicidade dos experimentos, bem como a validade dos procedimentos de análise. De acordo com essas idéias, testes com o impacto do martelo foram utilizados para detectar incrustação em tubulações.

Com o desenvolvimento das novas técnicas de detecção pretende-se reduzir os problemas causados pela incrustação; evitar a perda da capacidade operacional dos sistemas de transporte de fluidos; aumentar a segurança e otimizar a mão de obra para instalação e rapidez na obtenção das informações sobre o processo de incrustação, auxiliando assim na manutenção das tubulações.

# Abstract

This project presents techniques for fouling detection in ducts using no-invasive methods. Fouling is a problem which occurs in the chemical, petroleum, food and pharmaceutical industries. This process consists of the accumulation of heavy organic materials and other dissolved solids or in suspension in the fluid transport system.

The first technique is based on parameter estimation (with the model of Gaussian pulses) of a system that uses guided waves for fouling detection in pipes. With the used model, the modifications of the parameters are analyzed, when the fouling is present in the monitored pipes.

The second technique is based on Wavelet transform, which is a technique of signal analysis via linear combination of elementary functions. While Fourier transform uses a series of complex exponential with different frequencies, the Wavelet transform uses functions that are assigned and moving versions of a function model known as Wavelet mother. With Wavelets the signal energy distribution can be analyzed with the change of the time in different frequency band. Thus, the Wavelet transform is used to analyze ultrasonic signal for fouling detection in pipelines. The energies of the Wavelet coefficients of the ultrasonic signal are determined and the modifications in these energies were observed, when the fouling is present in the pipes.

The third technique is based on analysis of vibrations, with the use of a hammer impact. The vibrations are detected by an accelerometer or microphone, allowing the normalization of the measured vibration response for to find the signal response function. Tests with hammer impact have been used in many areas of the engineering for analysis of frequency response function (FRF) due the convenience and simplicity of the experiments, as well as the validity of the analysis procedures. Tests with the hammer impact were used to detect fouling in pipes.

With the development of the techniques of fouling detection, it is desired to: reduce the problems caused by fouling; avoid the loss of the operational capacity of the fluid transport systems; increase the safety, optimize the work hand for installation and speed in the obtaining of the information on the fouling process, aiding in the maintenance of the pipes.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	2
1.3	Metodologia . . . . .	3
1.4	Contribuições . . . . .	3
1.5	Sinopse dos capítulos . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Características gerais do processo de incrustação</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução . . . . .	5
2.2	Aspectos gerais . . . . .	8
2.3	Técnicas existentes . . . . .	11
2.4	Conclusões . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>14</b>
3.1	Introdução a propagação das ondas . . . . .	14
3.2	Tipos de onda . . . . .	15
3.2.1	Ondas planas . . . . .	15
3.2.2	Ondas esféricas . . . . .	15
3.2.3	Ondas de superfície . . . . .	16
3.3	Propagação de ondas em materiais isotrópicos . . . . .	16
3.3.1	Ondas planas . . . . .	16
3.3.2	Ondas de superfície . . . . .	20
3.4	Reflexão em um plano de contorno . . . . .	21
3.4.1	Onda longitudinal incidente . . . . .	22
3.4.2	Modo horizontal transversal incidente . . . . .	23
3.4.3	Modo vertical transversal incidente . . . . .	24
3.5	Ondas Guiadas . . . . .	26
3.6	Modelos para pulsos ultra-sônicos . . . . .	28
3.6.1	Modelo de Pulsos Gaussianos . . . . .	30
3.7	Teoria sobre Wavelets (Ondaletas) . . . . .	33
3.7.1	Conceitos básicos sobre Wavelets . . . . .	36
3.7.2	Características das Wavelets . . . . .	41
3.7.3	Wavelet Haar . . . . .	42
3.7.4	Wavelets Daubechies . . . . .	43
3.7.5	Interpretação da TWD pela teoria de filtros . . . . .	46

3.7.6	Análise da densidade de energia-tempo baseada na transformada Wavelet	47
3.8	Teste do impacto do martelo	49
3.8.1	O modelo do impacto do martelo	51
3.8.2	Uso de vibrações livres para determinação das propriedades de um sistema	53
3.9	Conclusões	54
<b>4</b>	<b>Detecção de incrustação utilizando ondas guiadas e estimação de parâmetros</b>	<b>55</b>
4.1	Introdução	55
4.2	Circuitos desenvolvidos	55
4.3	Plataforma de testes	59
4.4	Técnica Proposta usando estimação de parâmetros	62
4.5	Resultados obtidos com simulações	64
4.6	Resultados experimentais da estimação de parâmetros	66
4.7	Uso da FFT para determinação das frequências	71
4.8	Critério de sensibilidade para primeira técnica proposta	76
4.9	Conclusões	81
<b>5</b>	<b>Detecção de incrustação utilizando ondas guiadas e a transformada Wavelet</b>	<b>83</b>
5.1	Introdução	83
5.2	Técnica Proposta usando Wavelets	83
5.2.1	Primeiro Nível de Resolução do Algoritmo da TWD	84
5.2.2	Segundo Nível de Resolução do Algoritmo da TWD	85
5.2.3	$j$ -ésimo Nível de Resolução do Algoritmo da TWD	85
5.2.4	Exemplo de Uso da TWD	86
5.2.5	Cálculo da energia	87
5.3	Resultados obtidos com a determinação dos coeficientes Wavelets	88
5.4	Resultados obtidos com a determinação da energia dos coeficientes Wavelets	93
5.5	Critério de sensibilidade para segunda técnica proposta	98
5.6	Conclusões	102
<b>6</b>	<b>Detecção de incrustação utilizando análises de vibrações</b>	<b>104</b>
6.1	Introdução	104
6.2	Técnica Proposta usando análise de vibrações	104
6.3	Resultados obtidos	108
6.4	Resultados obtidos com o microfone	110
6.5	Resultados obtidos com o acelerômetro	116
6.5.1	Resultados obtidos com a análise de elementos finitos	119
6.6	Testes com diferentes camadas	124
6.7	Metodologia de análise dos testes	127
6.7.1	Testes com o acelerômetro	127
6.7.2	Testes com o microfone no domínio do tempo	129
6.7.3	Testes com o microfone no domínio da frequência	130
6.8	Critério de sensibilidade para terceira técnica proposta	131
6.9	Testes com uma tubulação real	133
6.10	Conclusões	137

<b>7</b>	<b>Conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros</b>	<b>139</b>
7.1	Conclusões gerais . . . . .	139
7.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	141
	<b>Bibliografia</b>	<b>142</b>

# Lista de Figuras

2.1	Fotografia de uma tubulação com incrustação (Petrobras). . . . .	6
2.2	Fotografia de um <i>PIG instrumentado</i> (Petrobrás). . . . .	7
3.1	Representação das ondas guiadas. . . . .	27
3.2	Exemplo de decomposição multiresolução. . . . .	35
3.3	Exemplo de uma Wavelet com diferentes valores de escala e fator de translação. . . . .	38
3.4	Diagrama de implementação da TWD. . . . .	40
3.5	Esquema de filtragem em sub-bandas. . . . .	46
3.6	Espectro de frequência dos filtros $L(z)$ e $H(z)$ . . . . .	47
3.7	Representação da estrutura com o martelo. . . . .	51
3.8	Diagrama equivalente do modelo de impacto do martelo. . . . .	52
3.9	Representação de um sinal com testes de vibração. . . . .	53
4.1	Diagrama de blocos do circuito pulsador. . . . .	56
4.2	Diagrama esquemático do circuito para o pulsador ultra-sônico. . . . .	56
4.3	Forma de onda do sinal de saída do circuito pulsador. . . . .	57
4.4	Diagrama de blocos simplificado do receptor ultra-sônico. . . . .	58
4.5	Diagrama esquemático do circuito receptor. . . . .	58
4.6	Forma de onda do sinal de saída do circuito receptor. . . . .	59
4.7	Diagrama da montagem utilizada. . . . .	60
4.8	Fotografia da plataforma utilizada. . . . .	60
4.9	Fotografia detalhada da plataforma utilizada. . . . .	61
4.10	Resultados da simulação para um pulso simples: Os pontos representam o sinal real e a linha cheia representa o sinal estimado. . . . .	65
4.11	Resultados da simulação para um sinal com pulsos múltiplos: Os pontos representam o sinal real e a linha cheia representa o sinal estimado. . . . .	66
4.12	Forma de onda do sinal de saída do receptor para tubulação sem incrustação. . . . .	67
4.13	Forma de onda do sinal de saída do receptor para tubulação com 1 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	68
4.14	Forma de onda de saída do receptor para tubulação com 3 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	68
4.15	Representação do sinal medido na saída do receptor (sinal tracejado) e do sinal estimado como pulsos Gaussianos (sinal contínuo) para tubulação sem incrustação. . . . .	69
4.16	Representação do sinal medido na saída do receptor (sinal tracejado) e do sinal estimado como pulsos Gaussianos (sinal contínuo) para tubulação com 1 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	70

4.17	Representação do sinal medido na saída do receptor (sinal tracejado) e do sinal estimado como pulsos Gaussianos (sinal contínuo) para tubulação com 3 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	70
4.18	Representação de um sinal com pulsos múltiplos. . . . .	72
4.19	Representação da FFT para o sinal da Figura 4.18. . . . .	72
4.20	Representação do sinal medido na saída do receptor para tubulação sem incrustação. . . . .	73
4.21	Representação do sinal medido na saída do receptor para tubulação com 1 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	74
4.22	Representação do sinal medido na saída do receptor para tubulação com 3 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	74
4.23	Representação da FFT para o sinal medido na saída do receptor para tubulação sem incrustação. . . . .	75
4.24	Representação da FFT para o sinal medido na saída do receptor para tubulação com 1 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	75
4.25	Representação da FFT para o sinal medido na saída do receptor para tubulação com 3 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	76
4.26	Gráfico da variação do parâmetro $\alpha$ em função da incrustação. . . . .	78
4.27	Gráfico da variação do parâmetro $\tau$ em função da incrustação. . . . .	79
4.28	Gráfico da variação do parâmetro $f_c$ em função da incrustação. . . . .	79
4.29	Gráfico da variação do parâmetro $\beta$ em função da incrustação. . . . .	80
4.30	Gráfico da variação do parâmetro $\varphi$ em função da incrustação. . . . .	80
4.31	Fluxograma para utilização da técnica 1. . . . .	81
5.1	Forma de onda do sinal de saída do receptor sem incrustação (Sinal de referência). . . . .	89
5.2	Forma de onda do sinal de saída do receptor com 1 <i>mm</i> de incrustação (Sinal de comparação). . . . .	89
5.3	Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para escala 1 (Tubulação sem incrustação). . . . .	90
5.4	Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para escala 3 (Tubulação sem incrustação). . . . .	90
5.5	Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para escala 1 (Tubulação com 1 <i>mm</i> de incrustação). . . . .	91
5.6	Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para escala 3 (Tubulação com 1 <i>mm</i> de incrustação). . . . .	91
5.7	Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para escala 1 (Tubulação sem incrustação). . . . .	92
5.8	Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para escala 3 (Tubulação sem incrustação). . . . .	92
5.9	Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para escala 1 (Tubulação com 1 <i>mm</i> de incrustação). . . . .	93
5.10	Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para escala 3 (Tubulação com 1 <i>mm</i> de incrustação). . . . .	93

5.11	Gráfico da Energia dos coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para os experimentos sem incrustação (a), com 1 <i>mm</i> de incrustação (b) e com 3 <i>mm</i> de incrustação (c) (Escala 1).	94
5.12	Gráfico da Energia dos coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para os experimentos sem incrustação (a), com 1 <i>mm</i> de incrustação (b) e com 3 <i>mm</i> de incrustação (c) (Escala 3).	95
5.13	Gráfico da Energia dos coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para os experimentos sem incrustação (a), com 1 <i>mm</i> de incrustação (b) e com 3 <i>mm</i> de incrustação (c) (Escala 1).	96
5.14	Gráfico da Energia dos coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para os experimentos sem incrustação (a), com 1 <i>mm</i> de incrustação (b) e com 3 <i>mm</i> de incrustação (c) (Escala 3).	96
5.15	Gráfico da variação dos valores máximos da energia, utilizando a Wavelet Haar na escala 1, em função da incrustação.	99
5.16	Gráfico da variação dos valores máximos da energia, utilizando a Wavelet Haar na escala 3, em função da incrustação.	100
5.17	Gráfico da variação dos valores máximos da energia, utilizando a Wavelet Daub4 na escala 1, em função da incrustação.	100
5.18	Gráfico da variação dos valores máximos da energia, utilizando a Wavelet Daub4 na escala 3, em função da incrustação.	101
5.19	Fluxograma para utilização da técnica 2.	102
6.1	Diagrama da topologia utilizando o método de vibração.	105
6.2	Diagrama elétrico do circuito de excitação do martelo.	106
6.3	Forma de onda do sinal de excitação do martelo.	106
6.4	Diagrama elétrico do circuito de detecção utilizando um microfone.	107
6.5	Diagrama elétrico do circuito de detecção utilizando um acelerômetro.	108
6.6	Representação de uma vista transversal da tubulação: (a) sem incrustação e (b) com incrustação.	109
6.7	Fotografia da vista transversal das tubulações utilizadas.	109
6.8	Fotografia da montagem utilizando o microfone.	110
6.9	Representação do sinal de saída do microfone para o tubo sem incrustação.	111
6.10	Representação do sinal de saída do microfone para o tubo com 5 <i>mm</i> incrustação.	111
6.11	Representação do sinal de saída do microfone para o tubo com 10 <i>mm</i> incrustação.	112
6.12	Forma de onda do sinal de saída do microfone, no domínio do tempo, para o tubo sem incrustação.	112
6.13	Forma de onda do sinal de saída do microfone, no domínio do tempo, para o tubo com 5 <i>mm</i> incrustação.	113
6.14	Forma de onda do sinal de saída do microfone, no domínio do tempo, para o tubo com 10 <i>mm</i> incrustação.	113
6.15	Representação do sinal de saída do microfone, no domínio da frequência, para o tubo sem incrustação (com água).	114
6.16	Representação do sinal de saída do microfone, no domínio da frequência, para o tubo com 5 <i>mm</i> incrustação (com água).	114

6.17	Forma de onda do sinal de saída do microfone, no domínio do tempo, para o tubo sem incrustação (com água). . . . .	115
6.18	Forma de onda do sinal de saída do microfone, no domínio do tempo, para o tubo com 5 <i>mm</i> incrustação (com água). . . . .	115
6.19	Fotografia da montagem utilizando o acelerômetro. . . . .	116
6.20	Forma de onda do sinal de saída do acelerômetro sem incrustação. . . . .	117
6.21	Forma de onda do sinal de saída do acelerômetro com 5 <i>mm</i> incrustação. . . . .	117
6.22	Forma de onda do sinal de saída do acelerômetro com 10 <i>mm</i> incrustação. . . . .	118
6.23	Forma de onda do sinal de saída do acelerômetro para o tubo sem incrustação (com água). . . . .	118
6.24	Forma de onda do sinal de saída do acelerômetro para o tubo com 5 <i>mm</i> incrustação (com água). . . . .	119
6.25	Curvas de contorno da simulação para o tubo sem incrustação. . . . .	120
6.26	Curvas de contorno da simulação para o tubo com 5 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	121
6.27	Curvas de contorno da simulação para o tubo com 15 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	121
6.28	Gráfico dos deslocamentos para o tubo sem incrustação. . . . .	122
6.29	Gráfico dos deslocamentos para o tubo com 5 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	123
6.30	Gráfico dos deslocamentos para o tubo com 15 <i>mm</i> de incrustação. . . . .	123
6.31	Representação do tubo com três níveis de incrustação. . . . .	124
6.32	Gráfico dos resultados com o microfone para três níveis de incrustação. . . . .	125
6.33	Gráfico dos resultados com o acelerômetro para três níveis de incrustação. . . . .	127
6.34	Representação do sinal na saída do acelerômetro. . . . .	128
6.35	Representação do sinal na saída do microfone, no domínio do tempo. . . . .	129
6.36	Representação do sinal na saída do microfone, no domínio da frequência. . . . .	130
6.37	Gráficos da variação dos sinais em função da incrustação: (a) com o acelerômetro, (b) com o microfone no domínio do tempo e (c) como microfone no domínio da frequência. . . . .	132
6.38	Fotografia da montagem utilizada nos testes com uma tubulação real. . . . .	134
6.39	Fotografia do interior da tubulação com diferentes níveis de incrustação. . . . .	134
6.40	Representação do sinal obtido com o microfone, para tubulação sem incrustação (Tubulação real). . . . .	135
6.41	Representação do sinal obtido com o microfone, para tubulação com aproximadamente 5 <i>mm</i> de incrustação (Tubulação real). . . . .	135
6.42	Forma de onda do sinal obtido com o acelerômetro, para tubulação sem incrustação (Tubulação real). . . . .	136
6.43	Forma de onda do sinal obtido com o acelerômetro, para tubulação com aproximadamente 5 <i>mm</i> de incrustação (Tubulação real). . . . .	136
6.44	Fluxograma para utilização da técnica 3. . . . .	137

# Lista de Tabelas

2.1	Propriedades acústicas [23]. . . . .	11
4.1	Resultados da simulação com pulsos simples. . . . .	64
4.2	Resultados da simulação com pulsos múltiplos. . . . .	65
4.3	Parâmetros estimados para os sinais medidos. . . . .	69
6.1	Resultados obtidos com o microfone para diferentes camadas. . . . .	125
6.2	Resultados obtidos com o acelerômetro para diferentes camadas. . . . .	126

# Lista de Símbolos

## Propagação de onda

$D_o$	- Valor do distúrbio no espaço
$A_o$	- Amplitude do distúrbio
$\omega$	- Freqüência angular
$k_o$	- Número de onda
$\bar{u}$	- Distúrbio
$r$	- Distância radial
$k_r$	- Vetor de onda na direção radial
$\sigma_{ij}$	- Componentes da pressão (tensão)
$\epsilon_{ij}$	- Componentes da deformação
$\lambda, \mu$	- Constantes de Lamé
$\nu$	- Taxa de Poisson
$\rho$	- Densidade do meio
$\Delta$	- Dilatação de volume
$\alpha$	- Fator de de atenuação
$R$	- Coeficiente de reflexão longitudinal
$T$	- Coeficiente de reflexão transversal
$S_R$	- Coeficiente de reflexão superficial

## Modelo de Sinais ultra-sônicos

$d$	- Espessura da placa
$\lambda$	- Comprimento de onda
$H(\omega)$	- Resposta em freqüência
$A_M(\omega)$	- Função magnitude
$\theta_f(\omega)$	- Ângulo de fase
$\alpha_A(\omega)$	- Coeficiente de atenuação
$v_p(\omega)$	- Velocidade de fase
$x_c$	- Espessura da camada do meio
$\omega$	- Freqüência angular
$\alpha_s(z, f)$	- Coeficiente de espalhamento
$\alpha_a(z, f)$	- Coeficiente de absorção

$z$	- Distância de propagação da onda ultra-sônica
$f$	- Freqüência do sinal
$\alpha$	- Fator de largura de banda
$\tau$	- Tempo de retorno
$f_c$	- Freqüência central
$\beta$	- Amplitude do pulso
$\varphi$	- Fase dos pulsos
$\theta_m$	- Vetor de parâmetros do pulso
$S_G(\cdot)$	- Modelo do pulso Gaussiano
$x_p(t)$	- Modelo do pulso ultra-sônico
$e_w$	- Processo WGN
$y_p(t)$	- Modelo para múltiplos pulsos
$P_{SS}(f)$	- Espectro de energia
$E_S$	- Energia do pulso
$\sigma_\nu^2$	- Variância do sinal
$SNR$	- Relação sinal ruído
$BW$	- Largura de banda do pulso

### Transformada wavelet

$S$	- Sinal original
$L$	- Filtro passa-baixa
$H$	- Filtro passa-alta
$D_j$	- Coeficientes de detalhes
$A_j$	- Coeficientes de aproximações
$j$	- Resolução
$k$	- Comprimento do vetor
$x(t)$	- Sinal contínuo
$\psi(\cdot)$	- Wavelet mãe
$TWC$	- Transformada Wavelet Contínua
$a$	- Dilatação ou fator de escala
$b$	- Fator de translação
$TWD$	- Transformada Wavelet Discreta
$F_s$	- Freqüência de amostragem
$\phi(x)$	- Função escala
$c_k$	- Constante para Wavelet Daubchies
$W_0$	- Subespaço de Wavelets
$\Delta t$	- Intervalo de amostragem
$\omega_s$	- Freqüência angular de amostragem
$u'(n)$	- Sinal na saída do filtro passa-baixa
$v'(n)$	- Sinal na saída do filtro passa-alta
$E(b)$	- Função densidade de energia-tempo

## Análise de vibrações

$A_e$	- Amplitude específica do pulso
$\Delta t_i$	- Tempo de duração do pulso
$F_a$	- Força aplicada
$k_1$	- Constante de dureza do material
$c_1$	- Coeficiente de amortecimento do martelo
$x_1$	- Deslocamento do martelo
$m_1$	- Massa do martelo
$v_0$	- Velocidade de impacto
$\omega_n$	- Frequência natural
$\varsigma$	- Coeficiente de amortecimento
$T$	- Período de oscilação
$t_n$	- Tempo em que ocorre o n-ésimo pico
$\delta$	- Decremento logarítmico
$x(t_n)$	- Amplitude em que ocorre o n-ésimo pico
$l_1$	- Distância entre os dispositivos
$l_2$	- Comprimento do tubo
$V_e(t)$	- Sinal de excitação do martelo
$V_a(t)$	- Sinal de saída do detector com o acelerômetro
$V_{mt}(t)$	- Sinal de saída do detector com o microfone no domínio do tempo
$V_{mf}(f)$	- Sinal de saída do detector com o microfone no domínio da frequência
$e_i$	- Espessura da incrustação
$A_i$	- Amplitude máxima do sinal $V_a(t)$
$A$	- Valor médio das amplitudes máximas
$N$	- Número de medições realizadas em cada experimento
$\tau_i$	- Tempo de duração do sinal
$P(t)$	- Envelope do sinal
$P_0$	- Amplitude máxima do sinal $V_{mt}(t)$
$d_i$	- Tempo de decaimento
$D$	- Valor médio dos tempos de decaimento
$f_{resi}$	- Frequência de ressonância
$V_i$	- Valor máximo do sinal $V_{mf}(f)$
$F$	- Valor médio das frequências de ressonância
$S_i(\cdot)$	- Sensibilidade

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

A incrustação é um problema que ocorre no transporte de fluidos em tubulações devido ao acúmulo de substâncias orgânicas ou inorgânicas na superfície interna destas tubulações. Este problema tem sido estudado principalmente nas indústrias químicas, petrolíferas, alimentícias e farmacêuticas [1-2]. A incrustação pode causar vários problemas como a redução do diâmetro interno da tubulação, o aumento da pressão interna podendo causar rompimentos, a perda de carga, o aumento do consumo de energia e dos custos de operação.

Para detectar incrustação algumas técnicas foram desenvolvidas, como o uso do cupom de massa [3], o uso do sensor de resistência elétrica [4] e os métodos que utilizam ultra-som [5]. O cupom de massa é uma placa com o mesmo material da tubulação sob análise, que por estar inserida dentro da tubulação sofre as mesmas modificações. Desta forma depois de um determinado período (dois a três meses) as modificações encontradas na placa, como corrosão ou incrustação, são atribuídas também a tubulação. O sensor de resistência elétrica consiste em um resistor que é inserido na tubulação. As alterações no valor desta resistência são causadas pelo acúmulo de material (incrustação) no mesmo, desta forma as modificações também são atribuídas as tubulações sob análise. A principal desvantagem destas duas técnicas é que os elementos para monitoração devem ser inseridos dentro da tubulação, de modo que o processo deve ser paralisado para instalação e retirada para análise. Por outro lado os métodos que utilizam ultra-som apresentam vantagens em relação as duas técnicas anteriores, uma vez que estes métodos são não-invasivos, ou seja, os elementos de monitoração, neste caso os transdutores ultra-sônicos, não são instalados no interior das tubulações.

O método que utiliza ondas guiadas ultra-sônicas pode ser utilizado para detecção da incrustação sem a necessidade de paralisação do processo para instalação e análise [5]. Os testes de vibração foram desenvolvidos e são utilizados para detecção de falhas em estruturas [6-10]. Estes testes podem utilizar o método do impacto do martelo que também é não-invasivo [11].

Empresas como a Petrobrás têm problemas com incrustação e gastam muito na manutenção das tubulações utilizadas no transporte dos fluidos (petróleo e gás). Em 2002 a Petrobrás gastava cerca de 2.500,00 dólares por quilômetro de tubulação durante as inspeções [12]. Atualmente, por não ter técnicas rápidas e precisas de detecção da incrustação, diariamente são colocadas substâncias anti-incrustantes nas tubulações, sem detectar se existe ou não a presença da incrustação nas mesmas. A utilização de anti-incrustantes e do *PIG instrumentado*, equipamento utilizado para fazer a limpeza e inspeção interna das tubulações, acarreta gastos diários e a paralisação do processo de transporte durante a utilização do *PIG (Pipeline Inspection Gauge)*, que também provoca perdas financeiras [13]. É observado que a incrustação, apesar de ser um processo aleatório e descontínuo, ou seja, ocorre em determinadas partes da tubulação e em outras não, podendo ter espessuras diferentes, surge principalmente em emendas (soldas) e curvas nas tubulações.

## 1.2 Objetivos

Neste projeto tem-se como objetivo principal desenvolver técnicas de detecção de incrustação, para analisar posições específicas das tubulações de forma não-invasiva, auxiliando o processo de manutenção destas tubulações, de modo a minimizar os gastos (na plataforma desenvolvida os elementos de excitação e recepção podem ser colocados a uma distância máxima de 70 cm). Com isso pretende-se desenvolver técnicas que possam detectar a incrustação e verificar sua tendência de aumento, facilitando assim a manutenção, de forma que as substâncias anti-incrustantes e o uso do *PIG* sejam utilizados somente quando a incrustação for detectada.

As técnicas propostas avaliam variações em alguns parâmetros medidos, tomando como referência tubulações limpas em condições conhecidas de temperatura, vazão e pressão, e associam as modificações nos parâmetros devido à presença da incrustação nas tubulações sob ensaio. Desta forma, se não há modificações nos parâmetros encontrados, significa que a tubulação está limpa e não precisa de manutenção. Mas se ocorrem modificações, isto é um indicativo do início do processo de incrustação. Se estas modificações aumentam, isto é atribuído ao aumento da incrustação, e a manutenção deve ser realizada para evitar problemas. Pode-se

---

também avaliar diferentes pontos da tubulação e localizar onde existem regiões mais incrustadas ou menos incrustadas, mesmo sem ter como referência uma tubulação limpa, bastando analisar as modificações (aumento ou redução) nos parâmetros analisados em pontos distintos.

### 1.3 Metodologia

As técnicas propostas avaliam diversos parâmetros para detecção da incrustação, uma vez que a composição da incrustação pode modificar os sinais monitorados e a análise de apenas um parâmetro pode ser insuficiente para a detecção da incrustação.

Para cada técnica proposta, determina-se os parâmetros para uma tubulação limpa, sendo estes parâmetros tomados como referência para análise da incrustação. Assim, um conjunto de medições é realizado e os dados obtidos são processados, de acordo com a técnica utilizada, e em seguida são comparados com os dados obtidos com a tubulação limpa para detectar a presença e a tendência de aumento da incrustação na tubulação monitorada.

Na primeira e na segunda técnica proposta são utilizados transdutores ultra-sônicos para geração e recepção de ondas guiadas, sendo os sinais recebidos processados e utilizados para análise da incrustação. Na terceira técnica proposta utiliza-se um microfone ou acelerômetro para aquisição dos dados e observa-se as vibrações provocadas pelo impacto de um martelo, para análise da incrustação.

### 1.4 Contribuições

Como contribuições do trabalho podem-se citar:

- O desenvolvimento de técnicas não-invasivas de detecção da incrustação, utilizando métodos baseados em ondas guiadas ultra-sônicas e análise de vibrações;
- Validação das técnicas desenvolvidas através de testes em tubulações utilizando simulações para auxiliar na metodologia, e dados reais com resultados experimentais para comprovação da capacidade das técnicas desenvolvidas.

## 1.5 Sinopse dos capítulos

Este trabalho é composto por sete capítulos, que são descritos a seguir:

- Neste capítulo é realizada uma introdução do trabalho, sendo apresentados a motivação, os objetivos, a metodologia e as contribuições.
- No Capítulo 2 são apresentadas as características gerais do processo de incrustação incluindo a origem deste processo, os problemas causados, os fatores que contribuem para o surgimento da incrustação e algumas técnicas de detecção existentes.
- No Capítulo 3 apresenta-se a fundamentação teórica sobre a propagação de ondas, ondas guiadas, o modelo de pulsos Gaussianos, a transformada Wavelet e o teste do martelo.
- No Capítulo 4 apresenta-se a primeira técnica desenvolvida, baseada em ondas guiadas e estimação de parâmetros.
- No Capítulo 5 apresenta-se a segunda técnica desenvolvida, utilizando ondas guiadas e a transformada Wavelet.
- No Capítulo 6 apresenta-se a terceira técnica desenvolvida, utilizando análises de vibrações, com o teste do martelo.
- As conclusões gerais em relação ao trabalho realizado e também as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 7.

# Capítulo 2

## Características gerais do processo de incrustação

### 2.1 Introdução

Quando alguma substância é transportada por tubulações, acumulam-se com o passar do tempo, materiais indesejados (incrustação) na parede interna dessas tubulações. Esses materiais podem ser provenientes da corrosão, de microorganismos vivos ou mortos ou de partículas orgânicas.

A incrustação origina-se de vários fatores dentre os quais pode-se destacar [14-15]:

- Sedimentação: Este processo é provocado pela ação da força da gravidade sobre as partículas suspensas no meio líquido.
- Cristalização ou solidificação: Hidrocarbonetos de origem parafínica quando resfriados tendem a depositar cristais no interior da tubulação. Para que a cristalização inicie é necessário um grau de supersaturação na solução antes que a precipitação ocorra.
- Reações químicas: Este processo geralmente conduz à incrustação por corrosão e por polimerização.
- Crescimento biológico: Este processo pode ser descrito como o crescimento de micro e macroorganismos (bactérias, fungos ou algas) aeróbios e anaeróbios, na superfície interna da tubulação. As bactérias fixam-se na parede interna do tubo devido ao fato de que o material na superfície passa a ser uma fonte de nutrientes.

No caso específico do petróleo os principais fatores são [14-15]:

- Efeito da solubilidade: O petróleo apresenta em sua constituição uma mistura de vários componentes dispersos. O que o torna estável é o equilíbrio de solubilidade entre todos estes componentes. Uma mudança neste equilíbrio pode causar a precipitação de um ou mais componentes levando a formação da incrustação.
- Agregação ou floculação: Na composição do petróleo, moléculas de asfaltene estão presentes. A diminuição da polaridade no meio do óleo causa a agregação e a floculação destes componentes.
- Efeito coloidal: Este efeito é resultado da combinação de asfaltenes floculados e das resinas presentes no óleo.

A incrustação pode causar a diminuição do diâmetro interno da tubulação, aumento da pressão interna, aumento do consumo de energia, provoca fissuras na tubulação e aumenta o custo com manutenção [14]. Nas tubulações também pode ocorrer o rompimento da estrutura em função da oxidação oriunda de reações químicas [16].

Na Figura 2.1 apresenta-se uma fotografia de uma tubulação com incrustação, cedida pela Petrobrás. Nesta figura também pode-se observar o processo de corrosão que geralmente ocorre com o processo de incrustação.



Figura 2.1: Fotografia de uma tubulação com incrustação (Petrobras).

Na Figura 2.2 apresenta-se uma fotografia de um *PIG instrumentado* da Petrobrás utilizado para fazer a limpeza e inspeção interna de tubulações, com diâmetro de 14 polegadas, que estão com incrustação.



Figura 2.2: Fotografia de um *PIG instrumentado* (Petrobrás).

Quando o produto do transporte é o petróleo, a situação é mais crítica. Atualmente a incrustação é um dos principais desafios para indústria petrolífera. Neste caso, a incrustação é o acúmulo de materiais indesejados na parede interna das tubulações e estes materiais podem ser asfaltene, parafina, resina, cera e produtos da corrosão [14].

A produção, transporte e processamento de petróleo, betume e outros compostos orgânicos pesados contendo hidrocarbonetos são, significativamente, afetados pela incrustação destes compostos com devastadoras conseqüências econômicas [17].

A produção do petróleo está associada à presença de água, a qual apresenta impurezas que dão origem a sérios problemas operacionais relacionados com a incrustação em dutos. A corrosividade, por exemplo é função do pH, da alcalinidade e é responsável pela presença de gases dissolvidos (sulfeto de hidrogênio -  $H_2S$ , gás carbônico -  $CO_2$ , oxigênio -  $O_2$ ), ácidos orgânicos, partículas sólidas, cloretos, bactérias e ainda por parâmetros como velocidade de fluxo, regime de escoamento, pressão e temperatura que influenciam na formação da incrustação [17].

A limpeza dos dutos incrustados, realizada com o objetivo de remover as camadas acumuladas na superfície interna da tubulação e o uso de agentes químicos, demanda tempo e significa

---

custo com manutenção. A necessidade de uma detecção rápida da incrustação é de fundamental importância para evitar que problemas maiores aconteçam e também que as manutenções preventivas e corretivas sejam realizadas no tempo certo, para reduzir os gastos, já que a limpeza dos dutos é efetuada através de manutenções regulares sem o conhecimento da localização da incrustação [18].

## 2.2 Aspectos gerais

Dados inadequados e a falta de informação sobre o mecanismo de incrustação têm inibido o desenvolvimento de passos preventivos que precisam ser levados em conta na fase do projeto dos sistemas com fluxo de fluido [4], [19].

Três fatores podem ser considerados para a redução e prevenção da incrustação [19]:

1. A resistência de fluxo devido a incrustação é um valor que varia com o tempo.
2. A capacidade para caracterizar as condições do início do processo de incrustação.
3. A monitoração do sistema baseado nas variáveis e mecanismos do processo de incrustação.

Os compostos orgânicos denominados pesados tais como cera, resina, asfaltene, diamandoide e compostos organometálicos podem existir num determinado tipo de óleo em várias quantidades e formas. Tais compostos podem se precipitar na mistura de óleo devido a várias forças que causam bloqueio no reservatório de óleo, no poço, no oleoduto, na produção de óleo e nas instalações de processamento [20]. Partículas sólidas suspensas no óleo podem aderir às paredes dos canais e reservatórios. Compostos orgânicos pesados e a deposição de sólidos durante a produção de óleo, transporte e processamento é um problema muito sério em muitas áreas [19], [21]. A precipitação de materiais orgânicos pesados, em muitas instâncias, percorrem desde o poço até a linha de produção, bombas, filtros e outros equipamentos de ajustes causando a formação da incrustação em todas as etapas do processo.

Os materiais de deposição propensos à incrustação podem ser controlados usando várias técnicas de tratamento químico e mecânico [22]:

- Mudanças no fluxo do fluido transportado;
- Eliminação de materiais incompatíveis com o fluxo;

- Variação da queda de pressão na instalação;
- Minimização da mistura de fluxos incompatíveis durante processos de transferência.

A fim de modelar e prever os problemas provocados pela incrustação em processos industriais, é necessário primeiro entender o que acontece e quais são as causas e efeitos da incrustação. Para isto é necessário examinar cuidadosamente e avaliar todos os dados e condições operacionais nos processos industriais para determinar quais as variáveis que são efetivas em incrustação e quais são os mecanismos de tais fenômenos. O objetivo deste esforço sempre é minimizar a limpeza total da incrustação, reduzir a frequência de parada das plantas e reduzir o custo fazendo mínimas modificações nos processos [17], [19].

A possibilidade de que o material incrustante faça parte da alimentação do sistema de transporte de um fluido ou seja proveniente da reação, agregação ou floculação no sistema deve ficar bem claro. O papel de várias condições operacionais no sistema em incrustação (pressões, temperaturas, composições, taxas de fluxo e suas variações) deve ser entendido e deve ser quantificado [22].

Como as incrustações são formadas predominantemente devido a separação de uma fase sólida ou condensada de um fluido (gás ou líquido), seus mecanismos e forças motrizes são totalmente diferentes e muitas vezes únicos. Geralmente, os problemas de incrustação são consequência da combinação de vários movimentos e reações de fase. Para modelá-los é necessário entender os seus mecanismos claramente e as naturezas interativas dos fenômenos envolvidos. Um ou mais dos efeitos ou mecanismos podem ser responsáveis pela incrustação nos processos industriais [22].

O próximo passo na modelagem da incrustação em processos industriais, sobre a qual é necessário ter informações, são as fases existentes no processo de incrustação, a saber [19]:

1. A necessidade do conhecimento sobre os processos industriais tais como a micro-estrutura, a composição química, a porosidade, a permeabilidade, as dimensões, a razão superfície volume e qualquer outra informação que pode caracterizar o início do processo de incrustação.
2. A migração (ou difusão) do material incrustante para o local onde a incrustação ocorre. No caso especial do conhecimento da natureza da incrustação é possível desenvolver um modelo de difusão para o processo.
3. A nucleação (iniciação) do local incrustado. A matéria é modelada usando o fenômeno

---

da nucleação e o conhecimento sobre os dados ou parâmetros do material nucleador (incrustante).

4. A fase de ataque é uma função das propriedades interfaciais do material incrustante na superfície onde a incrustação ocorre. Dados para estas propriedades devem ser gerados e esta fase de incrustação para os processos industriais deve ser modelada.
5. O fenômeno de crescimento e sua taxa devem ser estudados para poder prever em quanto tempo ocorrerá o bloqueio completo da tubulação para um certo material incrustante. Esta fase é uma função da natureza do material incrustante, de outros componentes presentes no sistema e outras variáveis como temperatura, taxa de fluxo e composição do fluxo.
6. Os fenômenos de erosão, envelhecimento e endurecimento devem ser estudados, pois o fato de que algumas incrustações pareçam ser regeneráveis inicialmente e não em tempos posteriores, é indicativo dos fenômenos de envelhecimento e endurecimento. Por isso há uma necessidade da estimação destes fenômenos.

Com todas as fases anteriores de incrustação bem compreendidas e modeladas, um sistema de previsão da incrustação pode ser desenvolvido. A dificuldade de modelar a incrustação se dá pelo fato deste processo não ocorrer de forma contínua, além de ser formado por diferentes tipos de substâncias que podem estar presentes em um determinado local e não estar presentes em outro local do duto [22].

Algumas técnicas desenvolvidas para detecção da incrustação, utilizam ondas ultra-sônicas. Uma onda sônica ao percorrer um material qualquer sofre, em sua trajetória, efeitos de dispersão e absorção, resultando na redução da sua energia ao percorrer o material. A intensidade do feixe sônico recebido por um transdutor é consideravelmente menor que a intensidade inicial de transmissão. Os principais fatores responsáveis por esta perda de intensidade podem ser classificados como: perdas por transmissão, efeitos de interferência e dispersão do feixe. As perdas por transmissão incluem absorção, espalhamento e o efeito da impedância acústica específica (produto da velocidade da onda pela densidade do material) nas interfaces. Os efeitos por interferência incluem a difração e outros efeitos que causam deslocamento de fase ou deslocamento de frequência da onda. A dispersão deve-se ao fato da matéria não ser totalmente homogênea, contendo interfaces naturais de sua própria estrutura ou processo de fabricação. O fenômeno da absorção ocorre sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico e ocorre principalmente pela conversão de energia mecânica em energia térmica. O movimento elástico das partículas durante a propagação do som, alternadamente aquece o material na

compressão e resfria na rarefação [23]. As propriedades acústicas de alguns materiais estão apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Propriedades acústicas [23].

Material	Densidade ( $kg/m^3$ )	Velocidade Longitudinal ( $m/s$ )	Impedância Acústica ( $10^6 kg/m^2s$ )
Aço carbono	7850	5920	46,472
Acrílico	1180	2730	3,221
Água	1000	1480	1,480
Alumínio	2700	6320	17,064
Ferro Fundido	7200	4600	33,120
Glicerina	1300	1920	2,496
Prata	10500	3600	37,800
Vidro	3600	4260	15,336

## 2.3 Técnicas existentes

Diante dos problemas causados pelo processo de incrustação, algumas técnicas foram desenvolvidas para sua detecção e da corrosão, que de modo geral ocorre simultaneamente. Dentre essas técnicas pode-se destacar o cupom de perda de massa [3], [13]; o sensor de resistividade elétrica [4], [13]; os métodos que utilizam ultra-som [1], [18].

O cupom é uma placa com o mesmo material que são fabricados os dutos, sendo instalada no interior da tubulação. Por ser do mesmo material dos dutos e está submetida as mesmas condições, o cupom apresenta igualmente as eventuais oxidações, que deterioram a tubulação. O cupom é retirado tipicamente da tubulação em intervalos que variam de um a três meses e recebe um tratamento químico para eliminar os óxidos que se formam em sua superfície, e em seguida, é pesado. A diferença entre o peso original do cupom e o peso medido quando retirado, levando-se em consideração o tempo e a área analisada, permite calcular uma taxa de corrosão associada a tubulação. Considera-se que a taxa de corrosão verificada no cupom é a mesma do duto. O uso do cupom permite a detecção da corrosão na tubulação ao avaliar a variação de sua massa em determinado período de tempo [3], [13]. O grau de corrosão existente é dependente do tipo de sistema de dutos envolvidos. Para dutos velhos, com muito tempo de utilização, não é aconselhável utilizar cupons novos, pois as diferenças nas superfícies podem causar possíveis erros na medição da taxa de corrosão [3]. O produto final da corrosão, que é

---

comumente chamado de ferrugem, é simplesmente o resultado de reações eletroquímicas através do qual os metais são lentamente revertidos em sua forma de natureza química (minério) [13].

O sensor de resistividade elétrica implantado no interior do duto, contém uma resistência padrão conhecida. Se o material começa a oxidar, o sensor apresenta um valor diferente da resistência padrão, pois a resistência do material oxidado não é igual a resistência do material sob condições normais [4], [13]. Os sensores de resistência elétrica para medir corrosão são comumente usados na indústria petrolífera, em processos químicos e outros ambientes onde é necessária a detecção da corrosão. A técnica de resistência elétrica é invasiva, ou seja, o sensor é colocado no interior da tubulação [4].

As ondas guiadas ultra-sônicas podem se propagar por longas distâncias em dutos e tem demonstrado uma sensibilidade excelente para camadas de viscosidade no interior da superfície dos dutos, comumente usados no processamento e transporte de fluidos [1], [18] e [24-25]. Para detecção da corrosão, trabalhos utilizando ondas guiadas têm apresentado bons resultados. A corrosão é indicada por um pulso adicional, um simples sinal de ruído ou uma mudança na velocidade de grupo [26-28].

Rose [18] utilizou o método de ondas guiadas, observando as variações das amplitudes dos sinais ultra-sônicos, para detecção da incrustação em tubulações; e também utilizou o método de vibrações, com o uso do impacto do martelo, observando a variação da velocidade dos sinais, para detecção de corrosão em tubulações. Gatts [29] utilizou o método de ondas guiadas, observando modificações nos sinais com a aplicação de wavelets, para detecção de falhas em tubulações. Estas técnicas apresentam bons resultados, mas apenas uma foi utilizada para detectar incrustação e as outras foram utilizadas para detectar corrosão ou falhas, como rachaduras, em tubulações. Uma outra característica destas técnicas, é que apenas um parâmetro é utilizado para detecção, de modo que se a variação no parâmetro analisado for muito pequena, a incrustação ou corrosão pode não ser detectada.

As técnicas que utilizam ultra-som têm sido empregadas há muito tempo em diversas aplicações [30-39]. Estas técnicas possuem alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas discontinuidades internas. No caso de radiografia ou gamagrafia, existe a necessidade do processo de revelação do filme, que via de regra demanda tempo para processamento da informação e análise dos resultados. Ao contrário dos ensaios por radiações penetrantes, as técnicas que utilizam ultra-som não requerem planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação [40-42].

As técnicas com análise de vibrações geralmente são utilizadas para detectar falhas ou rachaduras em estruturas que podem ser de concreto (aplicação em engenharia civil) ou metálicas

(aplicações em engenharia mecânica) [43-47]. Outras aplicações com ondas acústicas podem ser encontradas nas referências [48-52].

## 2.4 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as características gerais do processo de incrustação, definindo como ocorre e quais são os problemas causados. Também foram apresentadas algumas técnicas utilizadas. Diante dos problemas apresentados, tem-se a necessidade de estudar/avaliar novas técnicas para detecção e monitoramento da incrustação. As técnicas propostas podem ser comparadas considerando as variações nos parâmetros observados em função do aumento da incrustação nas tubulações monitoradas.

No Capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento e escolha das técnicas de detecção da incrustação com a utilização de métodos não-invasivos.

# Capítulo 3

## Fundamentação Teórica

### 3.1 Introdução a propagação das ondas

Uma onda acústica pode ser definida como um distúrbio (perturbação) que converte energia em um meio e depende da posição e do tempo [53].

A propagação da onda em uma dimensão pode ser representada por:

$$D_o(x, t) = A_o \sin(\omega t - k_o x) \quad (3.1)$$

onde:  $D_o(x, t)$  é o valor da perturbação no espaço em uma posição  $x$  e no tempo  $t$ ;  $A_o$  é a amplitude da perturbação;  $\omega$  é a frequência angular e  $k_o$  é o número de onda.

A frequência angular ( $\omega$ ) está relacionada com a frequência ( $f$ ) da onda por:

$$\omega = 2\pi f \quad (3.2)$$

O número de onda ( $k_o$ ) é dado por:

$$k_o = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.3)$$

onde:  $\lambda$  é o comprimento de onda.

O número de onda e a frequência angular estão relacionados por:

$$v = \frac{\omega}{k_o} = \lambda f \quad (3.4)$$

onde:  $v$  é a velocidade de fase, ou velocidade em que uma partícula se propaga na onda.

## 3.2 Tipos de onda

Considera-se três tipos básicos de ondas:

- Ondas planas;
- Ondas esféricas;
- Ondas de superfície.

### 3.2.1 Ondas planas

Em três dimensões a equação (3.1) pode ser escrita de uma forma geral como [53]:

$$\bar{u}(x, y, z) = (A_x \vec{i} + A_y \vec{j} + A_z \vec{k}) \cos(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t) \quad (3.5)$$

onde:  $\bar{u}$  é o distúrbio em  $x, y, z$  no instante  $t$ ;  $A_x \vec{i}, A_y \vec{j}, A_z \vec{k}$  são as amplitudes das componentes do distúrbio nas direções  $x, y$  e  $z$ ;  $k_x, k_y, k_z$  são as componentes do vetor de onda em três dimensões.

O vetor de onda tem uma magnitude  $k_o$  e direção paralela à direção de propagação da onda. As ondas definidas com a forma da equação (3.5) são chamadas ondas planas. Em três dimensões, a onda plana é uma perturbação (distúrbio) que tem a mesma fase, descrevendo um plano no espaço.

### 3.2.2 Ondas esféricas

As ondas esféricas são descritas por uma perturbação que possui um valor particular para uma determinada fase, que está sobre uma superfície esférica no espaço em três dimensões [53]. Se a onda é esféricamente simétrica, ela pode ser representada por:

$$\bar{u}(r, t) = \frac{A_o}{r} \cos(k_r r - \omega t) \quad (3.6)$$

onde:  $r$  é a distância radial a partir da origem da superfície esférica (centro);  $k_r$  é o vetor de onda na direção radial.

### 3.2.3 Ondas de superfície

As ondas de superfície são aquelas que se propagam ao longo da superfície de uma interface sólida ou fluídica. Suas energias são concentradas em uma região relativamente pequena sobre um comprimento de onda próximo da superfície. A perturbação é matematicamente representada pela multiplicação da amplitude por um fator de atenuação que causa uma redução nesta amplitude em direção à superfície [53].

## 3.3 Propagação de ondas em materiais isotrópicos

Os materiais isotrópicos são aqueles em que as propriedades mecânicas não se modificam com a mudança de direção, em cada ponto do material. O comportamento das ondas planas e de superfície, nestes materiais, é apresentado a seguir.

### 3.3.1 Ondas planas

Um meio, contendo um material linear, elástico, homogêneo e isotrópico, pode ser representado pelas equações constitutivas, relações entre tensões e deformações [53-54], a seguir, como consequência da escolha de energia livre:

$$\sigma_{xx} = (\lambda + 2\mu)\epsilon_{xx} + \lambda(\epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \quad (3.7)$$

$$\sigma_{yy} = (\lambda + 2\mu)\epsilon_{yy} + \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{zz}) \quad (3.8)$$

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu)\epsilon_{zz} + \lambda(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) \quad (3.9)$$

$$\sigma_{yz} = \sigma_{zy} = 2\mu\epsilon_{yz} = 2\mu\epsilon_{zy} \quad (3.10)$$

$$\sigma_{zx} = \sigma_{xz} = 2\mu\epsilon_{zx} = 2\mu\epsilon_{xz} \quad (3.11)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = 2\mu\epsilon_{xy} = 2\mu\epsilon_{yx} \quad (3.12)$$

onde:  $\sigma_{ij}$  são as componentes da tensão (pressão);  $\epsilon_{ij}$  são as componentes da deformação;  $\lambda$  e  $\mu$  são as constantes de Lamé.

Esta forma é comumente chamada de Lei de Hooke. As constantes de Lamé estão relacionadas com o módulo de Young ( $E$ ) e com a taxa de Poisson ( $\nu$ ) pelas relações:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.13)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.14)$$

As equações diferenciais que governam a equação de movimento para um meio contínuo são dadas por [53-54]:

$$\frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \quad (3.17)$$

onde:  $u_x$ ,  $u_y$  e  $u_z$  são as componentes do vetor deslocamento das partículas.

Considere uma onda plana da forma:

$$u_x = A_x \cos(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t) \quad (3.18)$$

$$u_y = A_y \cos(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t) \quad (3.19)$$

$$u_z = A_z \cos(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t) \quad (3.20)$$

onde:  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  são as componentes da amplitude do deslocamento;  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  são as componentes do vetor de onda.

O vetor de onda, de fato, tem uma magnitude igual ao número de onda  $k_o$ :

$$k_o = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \quad (3.21)$$

onde o número de onda e a frequência angular estão relacionadas com a velocidade de fase da onda de acordo com a equação (3.4)

Com algumas manipulações matemáticas, as relações entre deformações e deslocamentos, equações (3.22 à 3.27), podem ser usadas para obter a equação de onda em três dimensões [53].

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (3.22)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad (3.23)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (3.24)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (3.25)$$

$$\epsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \quad (3.26)$$

$$\epsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \quad (3.27)$$

A equação de onda tridimensional que governa a propagação através de um material linear, elástico, homogêneo e isotrópico é dada por [53-54]:

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u_x = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (3.28)$$

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 u_y = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (3.29)$$

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 u_z = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \quad (3.30)$$

onde:  $\Delta$  é a dilatação de volume dos deslocamentos dados pela soma das deformações normais (Traço de  $\epsilon$ ):

$$\Delta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} \quad (3.31)$$

e  $\nabla^2$  é o operador Laplaciano, definido pelo seguinte conjunto de derivadas:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3.32)$$

Os deslocamentos das partículas assumidos, equações (3.18 à 3.20), são substituídos nas equações (3.28 à 3.30). E os valores resultantes de  $\epsilon_{ij}$  são substituídos nas equações da Lei de Hooke (3.7 à 3.12) para obter expressões para as componentes de pressão (tensão) [53].

Finalmente estas expressões para as componentes de tensão são substituídas nas equações diferenciais de movimento (3.15 à 3.17). As equações resultantes são algébricas e são conhecidas como equações de Christoffel:

$$[(\lambda + \mu)a_x a_x + (\mu - \rho)v^2]A_x + (\lambda + \mu)a_x a_y A_y + (\lambda + \mu)a_x a_z A_z = 0 \quad (3.33)$$

$$(\lambda + \mu)a_y a_x A_x + [(\lambda + \mu)a_y a_y + (\mu - \rho)v^2]A_y + (\lambda + \mu)a_y a_z A_z = 0 \quad (3.34)$$

$$(\lambda + \mu)a_z a_x A_x + (\lambda + \mu)a_z a_y A_y + [(\lambda + \mu)a_z a_z + (\mu - \rho)v^2]A_z = 0 \quad (3.35)$$

O vetor unitário  $\vec{a}$  na direção da propagação é definido por:

$$\vec{a} = \frac{\vec{k}}{k_o} \quad (3.36)$$

onde: a magnitude de  $\vec{k}$  é o número de onda, como definido na equação (3.21).

As equações (3.33 à 3.35) são homogêneas na variável  $v^2$ . Se existe uma solução não-trivial (não nula) para  $v^2$ , então o determinante na equação (3.37) fornece os valores das velocidades da onda, que podem se propagar num dado material.

$$\begin{vmatrix} (\lambda + \mu)a_x a_x + (\mu - \rho)v^2 & (\lambda + \mu)a_x a_y & (\lambda + \mu)a_x a_z \\ (\lambda + \mu)a_y a_x & (\lambda + \mu)a_y a_y + (\mu - \rho)v^2 & (\lambda + \mu)a_y a_z \\ (\lambda + \mu)a_z a_x & (\lambda + \mu)a_z a_y & (\lambda + \mu)a_z a_z + (\mu - \rho)v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.37)$$

A equação (3.37) tem raízes reais e positivas, de modo que existem três valores reais para a velocidade de fase, que são soluções para a equação de Christoffel. Para materiais isotrópicos,

duas das raízes da equação (3.37) são iguais, de forma que existem apenas dois valores distintos para as velocidades da onda. Os valores destas raízes são [53-54]:

$$v_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (3.38)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.39)$$

Se estas raízes são substituídas na velocidade de fase  $v$  no conjunto de equações homogêneas (3.33 à 3.35), a direção correspondente do vetor de deslocamento das partículas que pode se propagar com as duas velocidades de onda distintas é encontrada. A primeira raiz apresenta deslocamento das partículas que são sempre paralelas ao vetor de onda. Este modo é chamado longitudinal (devido a relação paralela entre o deslocamento das partículas e a direção de propagação).

A segunda raiz é uma raiz dupla para a equação determinante. Esta raiz apresenta deslocamento das partículas que são sempre perpendiculares ao vetor de onda. Por esta razão, este modo é chamado de transversal.

As ondas longitudinais se propagam com uma velocidade maior que as transversais devido as constantes  $\lambda$  e  $\mu$  serem sempre positivas [53].

### 3.3.2 Ondas de superfície

Algumas ondas se propagam em materiais ao longo da superfície e se expandem em duas dimensões. No espalhamento em duas dimensões é observado que a maior perda segue uma perturbação que é causada pela propagação de velocidades menores que a velocidade de fase da onda transversal. Para modelar estas ondas, Rayleigh sugere que elas sejam representadas pelas seguintes equações [53]:

$$u_x = A_1 e^{-\alpha z} \cos(k_y y - \omega t) \quad (3.40)$$

$$u_y = A_2 e^{-\alpha z} \cos(k_y y - \omega t) \quad (3.41)$$

$$u_z = A_3 e^{-\alpha z} \cos(k_y y - \omega t) \quad (3.42)$$

onde:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  são as amplitudes dos campos de deslocamento associados à onda;  $\alpha$  é o fator de atenuação.

O fator de atenuação causa a redução da amplitude da onda que se desloca do contorno para o interior do material [53].

A onda tendo deslocamentos dados pelas equações (3.40 à 3.42) deve satisfazer as equações de movimento (3.28 à 3.30) e deve satisfazer também as condições de contorno ao longo da superfície do material. Se a superfície é livre, o que é uma boa aproximação para testes ultra-sônicos, a pressão (tensão) deve ser zero em  $z = 0$ :

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zz} = 0 \quad (3.43)$$

Para propósitos práticos, a onda é considerada retida no sólido e o contorno é considerado como sendo um espaço livre. Então, a consideração de pressão zero no contorno é aceitável [53].

A onda de superfície apresenta duas características importantes: Primeiro, a velocidade de fase é menor que a velocidade transversal; e segundo, o coeficiente de atenuação é sempre positivo, de modo que a propagação da onda está sobre o contorno da superfície do material [53].

### 3.4 Reflexão em um plano de contorno

Um problema simples, que pode ser tratado por uma onda incidente ultra-sônica na superfície de um material, é aquele em que a onda está em um meio livre, num plano de contorno e em um material isotrópico [53]. O plano  $yz$  pode ser considerado como o plano de incidência. O plano incidente contém a normal  $n$  para o plano de contorno e o vetor de onda da onda incidente.

O problema pode ser considerado em três partes:

1. Uma onda longitudinal incidente (Chamada de onda  $P$ ).
2. Uma onda transversal incidente com deslocamentos das partículas paralelo a superfície de contorno (Chamada de onda horizontal transversal ( $SH$ )).

3. Uma onda transversal incidente com deslocamentos das partículas sobre o plano incidente (Chamada de onda vertical transversal (*SV*)).

### 3.4.1 Onda longitudinal incidente

Uma onda longitudinal incidente  $P$  apresenta deslocamentos das partículas paralelo a direção do vetor de onda  $\vec{k}$ . A direção do vetor de onda é dada em relação a normal  $n$  do plano de contorno pelo ângulo de incidência  $\theta_I$ . Assim o deslocamento das partículas da onda incidente pode ser escrito como [53]:

$$\bar{u}_I = [\vec{j} \sin \theta_I + \vec{k}_u \cos \theta_I] A_I e^{j(\omega t - k_y y + k_z z)} \quad (3.44)$$

onde:  $k_y = k_I \sin \theta_I$ ;  $k_z = k_I \cos \theta_I$ ;  $\vec{j}$  é o vetor unitário paralelo ao eixo  $y$ ;  $\vec{k}_u$  é o vetor unitário paralelo ao eixo  $z$ .

Este campo de deslocamento deve satisfazer as equações de movimento (3.28 à 3.30) e devem satisfazer também as condições de pressão livre na superfície do material [53].

Desde que dois tipos de ondas podem satisfazer a equação de movimento para um material isotrópico, considera-se a possibilidade que duas ondas refletidas resultam de uma onda incidente  $P$  [53]. As ondas refletidas são então, uma onda  $P$  com ângulo  $\theta_P$ :

$$\bar{u}_P = [\vec{j} \sin \theta_P + \vec{k}_u \cos \theta_P] A_P e^{j(\omega t - k_P y - k_P z)} \quad (3.45)$$

e uma onda transversal refletida  $S_r$  com ângulo  $\theta_T$ :

$$\bar{u}_T = [\vec{j} \sin \theta_T + \vec{k}_u \cos \theta_T] A_T e^{j(\omega t - k_T y - k_T z)} \quad (3.46)$$

A condição de contorno pode agora ser escrita da seguinte forma, para  $z = 0$ :

$$\sigma_{zz} = \sigma_{zy} = 0 \quad (3.47)$$

Quando substituindo estas equações usando as equações constitutivas (equações 3.7 à 3.12), as relações de deslocamento e deformações (3.22 à 3.27), o campo de deslocamento da onda incidente  $P$  (equação 3.44), a onda  $P$  refletida (equação 3.45) e a onda  $S_r$  refletida (equação 3.46), um sistema de duas equações algébricas é obtido [53].

Estas equações fornecem duas importantes conclusões, de acordo com a natureza das ondas refletidas. Primeiro, para que as equações sejam satisfeitas em todo tempo e posição ao longo do contorno, o seguinte conjunto de igualdades deve ser satisfeito:

$$\frac{v_I}{\sin \theta_I} = \frac{v_P}{\sin \theta_P} = \frac{v_T}{\sin \theta_T} \quad (3.48)$$

Estas equações são a expressão matemática para a Lei de Snell. Elas estabelecem que as ondas incidente e refletida devem se propagar ao longo do contorno com a mesma velocidade de fase [53].

A segunda importante propriedade obtida para estas equações algébricas, fornece informações sobre o valor relativo da amplitude de cada onda refletida comparada com a onda incidente. As relações da amplitude da onda longitudinal refletida ( $A_P/A_I$ ) e da onda transversal refletida ( $A_T/A_I$ ) comparada com a amplitude da onda incidente são chamadas de coeficientes de reflexão [53]. Os coeficientes de reflexão podem ser expressos por:

$$R = \frac{\sin 2\theta_I \sin 2\theta_T - k_R \cos^2 2\theta_T}{\sin 2\theta_I \sin 2\theta_T + k_R \cos^2 2\theta_T} \quad (3.49)$$

$$T = \frac{2k_R \sin 2\theta_I \cos 2\theta_T}{\sin 2\theta_I \sin 2\theta_T + k_R \cos^2 2\theta_T} \quad (3.50)$$

onde:  $R$  é o coeficiente de reflexão para onda longitudinal;  $T$  é o coeficiente de reflexão para onda transversal;  $k_R$  é a razão de velocidades entre as ondas  $P$  e  $S_r$ . Sendo:

$$k_R = \frac{v_L^2}{v_T^2} = \frac{2(1 - \nu)}{1 - \nu} \quad (3.51)$$

### 3.4.2 Modo horizontal transversal incidente

O campo de deslocamento para este modo é dado por [53]:

$$\bar{u}_{SH} = \vec{i} A_{SH} e^{j(\omega t - k_y y + k_z z)} \quad (3.52)$$

Assumindo que as ondas refletidas são uma onda longitudinal do tipo da equação (3.45) e uma onda transversal do tipo da equação (3.46), com potencialidade para uma componente adicional na direção do eixo  $x$ , temos:

$$\bar{u}_T = \vec{i}A_{SH}A_{T1} + [\vec{j} \sin \theta_T + \vec{k} \cos \theta_T]A_{T2}e^{j(\omega t - k_T y - k_T z)} \quad (3.53)$$

Neste caso não ocorre conversão de modos e a amplitude do modo refletido é igual a amplitude do modo incidente [53].

### 3.4.3 Modo vertical transversal incidente

Este problema é tratado em uma faixa de ângulos incidentes menores que um ângulo específico chamado de ângulo crítico e ângulos incidentes maiores que o ângulo crítico [53]. Assumindo uma onda transversal incidente com deslocamentos das partículas paralelos ao plano incidente, temos:

$$\bar{u}_I = [\vec{j} \sin \theta_I + \vec{k} \cos \theta_I]A_I e^{j(\omega t - k_I y - k_I z)} \quad (3.54)$$

O ângulo crítico para reflexão (e refração) de uma onda é definido pela Lei de Snell, como sendo o ângulo de incidência para o qual o ângulo do modo longitudinal refletido torna-se  $\pi/2$ . Para qualquer ângulo de incidência maior que o ângulo crítico, nenhum modo longitudinal refletido ocorre. As condições de contorno não podem ser satisfeitas pela reflexão das ondas longitudinal e transversal. Neste caso o único tipo de onda possível é uma onda de superfície [53].

Quando a onda incidente é uma onda transversal, a Lei de Snell torna-se:

$$\frac{v_T}{\sin \theta_T} = \frac{v_P}{\sin \theta_P} \quad (3.55)$$

ou

$$\sin \theta_P = \sin \theta_T \left[ \frac{v_P}{v_T} \right] \quad (3.56)$$

Devido  $v_P$  ser sempre maior que  $v_T$ , a relação de velocidade de fase no lado direito da equação (3.56) é sempre maior que 1. Existe uma solução real para  $\theta_P$  somente para valores do  $\sin \theta_T$  no qual o produto do  $\sin \theta_T$  pela relação de velocidades de fase  $v_P/v_T$  for menor que 1. De fato, existe um valor do ângulo de incidência  $\theta_T$  que torna o lado direito da equação (3.56) exatamente igual a 1 [53]:

$$\theta_{TC} = \sin^{-1}\left[\frac{v_T}{v_L}\right] \quad (3.57)$$

Para todos os ângulos incidentes menores que  $\theta_{TC}$ , existem soluções reais para  $\theta_P$  na equação (3.56). Para todos os ângulos incidentes maiores que  $\theta_{TC}$ , não existem soluções reais para  $\theta_P$  e não ocorre a propagação da onda longitudinal refletida. O ângulo  $\theta_{TC}$  é chamado de ângulo crítico de reflexão, pois ele separa o problema de reflexão para um modo incidente  $SV$  em duas regiões dependentes do ângulo de incidência. Existe uma região onde as ondas longitudinal e transversal ( $SV$ ) são refletidas e outra região onde um modo  $SV$  e um modo de superfície são refletidos (para ângulos de incidência menores e maiores que o ângulo crítico, respectivamente) [53].

### Ângulos incidentes menores que o ângulo crítico de reflexão

Em uma onda incidente  $SV$ , para todos os ângulos menores que o ângulo crítico, ambos os modos  $P$  e  $SV$  se propagam. Em todos os casos, existe sempre um modo longitudinal refletido para esta faixa de ângulos incidentes. Com as condições de pressão livre, existe um conjunto de coeficientes de reflexão para este problema [53]:

$$R = \frac{2k_R \cos 2\theta_T \sin 2\theta_T}{2 \sin 2\theta_L \sin 2\theta_T + k_R \cos^2 2\theta_T} \quad (3.58)$$

$$T = \frac{2 \sin 2\theta_L \sin 2\theta_T - k_R \cos^2 2\theta_T}{2 \sin 2\theta_L \sin 2\theta_T + k_R \cos^2 2\theta_T} \quad (3.59)$$

Todos os parâmetros têm as mesmas definições dadas anteriormente para o modo longitudinal refletido.

### Ângulos incidentes maiores que o ângulo crítico de reflexão

Para uma onda incidente  $SV$ , com ângulo incidente maior que o ângulo crítico, um modo longitudinal refletido  $P$  não se propaga. A equação que governa o movimento estabelece que apenas as ondas  $P$  e  $S$  se propagam em um meio elástico linear. Assim, existe um outro modo que não se propaga no interior, mas está confinado ao longo ou próximo da superfície de contorno [53].

Usando os campos de deslocamentos assumidos para os modos incidente e refletidos  $SV$ , (equações 3.45 e 3.46 respectivamente), uma onda de superfície com deslocamentos da forma assumida por Rayleigh (equações 3.40 à 3.42) nas equações de movimento (3.28 à 3.30) e nas condições de contorno para pressão (equação 3.43), um conjunto de equações algébricas é encontrado para caracterizar os deslocamentos para este tipo de onda [53].

A onda de superfície é deslocada por uma fase  $\xi$  em relação a onda incidente. O coeficiente de reflexão para a onda de superfície refletida é dado por [53]:

$$S_R = 2 \sin \xi \sin \theta_T \tan 2\theta_T \quad (3.60)$$

E o ângulo de fase é dado por:

$$\xi = \tan^{-1} \frac{\cos^2 2\theta_T}{2 \sin \theta_T \sin 2\theta_T \sqrt{\sin^2 \theta_T - \frac{1}{k_R}}} \quad (3.61)$$

### 3.5 Ondas Guiadas

As ondas guiadas são geradas pela interferência de dois tipos de ondas: Longitudinal (L) e Transversal (T). A onda longitudinal é gerada quando o movimento das partículas do meio é paralelo à direção de propagação da onda. Já a onda transversal é gerada quando o movimento das partículas é perpendicular à direção de propagação da onda. Assim as ondas guiadas são geradas pela interferência destes dois tipos de onda, deste que a espessura da parede ( $d$ ) do material sob teste seja menor ou igual ao comprimento de onda ( $\lambda$ ) da onda guiada [1], [18]. Na Figura 3.1 ilustra-se a formação de ondas guiadas em uma placa: quando a espessura ( $d$ ) da placa diminui, as ondas transversais (T) e longitudinais (L) se interferem para gerar as ondas guiadas. Nesta figura apresenta-se também um transdutor, que é utilizado para gerar os pulsos ultra-sônicos, que se propagam pela placa.

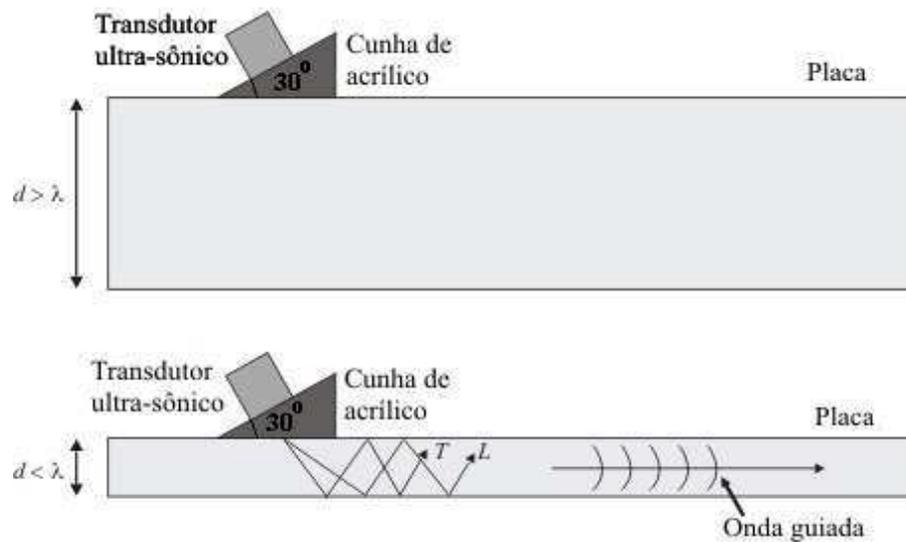


Figura 3.1: Representação das ondas guiadas.

Para gerar as ondas guiadas, duas condições básicas são necessárias: Primeiro a espessura da parede da tubulação sob teste deve ser menor ou igual ao comprimento de onda do sinal propagado, e isto é possível ajustando a frequência de excitação do pulsador. Segundo deve-se encontrar o ângulo de excitação para os transdutores ultra-sônicos. Neste caso, o ângulo de excitação é encontrado determinando-se o ângulo crítico, pois para ângulos maiores que o ângulo crítico, as ondas longitudinais não são geradas e conseqüentemente, as ondas guiadas também não são geradas [53], [55].

Os transdutores ultra-sônicos são tipicamente excitados com pulsos com amplitudes que variam de 100 a 1000 V. O sinal recebido pelo receptor pode variar de microvolts a alguns volts. O sinal recebido pode exibir características de frequência muito diferentes dos pulsos usados para excitar o transdutor transmissor, devido as características do meio de propagação [56].

Após a recepção, os sinais são amplificados e filtrados. Os parâmetros de ganho e largura de faixa do receptor são ajustados de acordo com as características do sistema utilizado. A escolha do ganho e da largura de faixa também são influenciados pelo transdutor utilizado, descontinuidades e características da resposta de frequência do pulsador. Quando o sinal ultra-sônico encontra uma nova interface (material diferente), parte do sinal se propaga por esta interface modificando as características do sinal transmitido.

O uso de modelos pode ajudar na análise dos sinais ultra-sônicos monitorados, de forma que os parâmetros destes modelos podem ser analisados e as modificações em tais parâmetros

podem ser associadas à incrustação no processo estudado.

### 3.6 Modelos para pulsos ultra-sônicos

Na modelagem de pulsos ultra-sônicos é observada a propagação da onda ultra-sônica através do meio, bem como a interação da onda com alguma falha presente no material sob inspeção. Alguns modelos são baseados na teoria escalar da difração e utilizam transdutores piezo-elétricos [57].

Quando um pulso ultra-sônico passa através de uma camada de um meio para outro, a forma de onda do pulso é modificada devido à atenuação e dispersão do meio. Em muitos meios, tem sido observada uma função de atenuação que aumenta com a frequência. Como resultado, as componentes de alta frequência do pulso são mais atenuadas que as componentes de baixa frequência. Após passar pela camada, o pulso transmitido não é mais igual ao pulso incidente, e apresenta uma forma diferente (amplitude, frequência, fase) [58].

O método clássico para prever mudanças na forma de onda de um sinal, passando através de um meio, recai sobre a resposta ao impulso do sistema, assim o sinal de saída é a convolução do sinal de entrada com a resposta ao impulso do sistema. A resposta ao impulso pode ser obtida pela transformada inversa de Fourier da resposta em frequência do sistema, que geralmente é representada pela equação (3.62) de acordo com He [58]:

$$H(\omega) = A_M(\omega)e^{-j\theta_f(\omega)x_c} = e^{-\alpha_A(\omega)x_c}e^{-jx_c\omega/v_p(\omega)} \quad (3.62)$$

onde:  $H(\omega)$  é a resposta em frequência,  $A_M(\omega)$  é a função magnitude,  $\theta_f(\omega)$  é o ângulo de fase por unidade de distância,  $\alpha_A(\omega)$  é a função atenuação,  $v_p(\omega)$  é a velocidade de fase, e  $x_c$  é a espessura da camada. Se  $\alpha_A(\omega)$  e  $v_p(\omega)$  são conhecidos, a resposta ao impulso do meio pode ser sintetizada e o sinal de saída então pode ser determinado.

A propagação de pulsos ultra-sônicos pode ser estudada pela decomposição do pulso em componentes de onda, e então se analisa a propagação de cada componente individualmente. Existem diferentes formas para decompor um sinal. A transformada de Fourier discreta decompõe um sinal em formas de onda senoidal, cada uma com uma simples frequência. Análises modernas usando Wavelet decompõem um sinal em um conjunto de componentes wavelet pela dilatação e translação da Wavelet mãe. A análise Wavelet é mais eficiente que a análise de Fourier quando o sinal é dominado por componentes transitórias ou por descontinuidades [58].

Em ensaios ultra-sônicos com materiais, a análise espectral dos pulsos (ecos) é também uma ferramenta útil para detecção de falhas, estimação de mudanças na frequência e caracterização dispersiva dos pulsos. O método Auto Regressivo (AR), o método de Prony e o método de Classificação de Sinal Múltiplo (MUSIC) têm sido utilizados em aplicações em ensaios ultra-sônicos [59]. A frequência de máxima energia estimada utilizando estes métodos apresenta excelente sensibilidade para detectar modificações nas frequências dos pulsos ultra-sônicos.

A análise espectral é uma alternativa recomendável para avaliar mudanças de amplitude devido a falhas em materiais sob testes em ensaios ultra-sônicos. Frequentemente os pulsos associados as falhas são comparáveis aos ruídos de espalhamento microestrutural. A análise espectral é uma técnica útil quando certas características ocultas no domínio do tempo podem ser detectadas. Estas características são basicamente relacionadas com a frequência de máxima energia, ou com a presença/ausência de energias em certas bandas de frequência. Pela aplicação de técnicas de análise espectral, a informação de frequência encontrada em padrões aleatórios de pulsos ultra-sônicos pode ser extraída e analisada [59].

A exploração do conteúdo de frequência dos sinais ultra-sônicos podem apresentar espectros de energia correspondente às geometrias dos refletores (falhas ou defeitos) [59]. O trabalho de Mason e McSkimm [60] apresenta o fato de que o espalhamento contribui fortemente para a atenuação dos pulsos ultra-sônicos, e que a atenuação é dependente da absorção que é uma função linear da frequência. O modelo para o coeficiente de atenuação dependente da frequência, de acordo com Saniie e Jin [59], é definido pela equação (3.63):

$$\alpha_A(z, f) = \alpha_a(z, f) + \alpha_s(z, f) \quad (3.63)$$

onde:  $\alpha_s(z, f)$  é o coeficiente de espalhamento,  $\alpha_a(z, f)$  é o coeficiente de absorção,  $z$  representa a distância que a onda ultra-sônica se propaga e  $f$  é a frequência da onda ultra-sônica.

A intensidade do espalhamento é uma função não-implícita do diâmetro individual do material, do comprimento de onda, de características anisotrópicas inerentes ao material, e da orientação aleatória dos cristais que formam o material [59].

O Modelo de Pulsos Gaussianos [61-63] também é utilizado para analisar pulsos ultra-sônicos, além de ser um modelo mais detalhado e apresentar os parâmetros que definem os pulsos ultra-sônicos de forma mais completa, uma vez que utiliza cinco parâmetros para o sinal (fator de largura de banda, tempo de retorno, frequência central, amplitude e fase).

### 3.6.1 Modelo de Pulsos Gaussianos

Os padrões de pulsos ultra-sônicos apresentam informações importantes com relação a forma, tamanho e orientação das reflexões, bem como a micro-estrutura do caminho de propagação dos pulsos [61-63].

Os pulsos ultra-sônicos podem ser modelados em termos de pulsos Gaussianos afetados por ruído [61-63]. Cada pulso Gaussiano no modelo é uma função não linear de um conjunto de parâmetros: fator de largura de banda ( $\alpha$ ), tempo de retorno ( $\tau$ ), frequência central ( $f_c$ ), amplitude ( $\beta$ ) e fase ( $\varphi$ ). A estimação destes parâmetros pode ser feita através de métodos de estimação não linear, assumindo que todos os parâmetros que descrevem a forma do pulso são desconhecidos, mas determinísticos [61-63].

A formação dos pulsos pode ser estudada através do sistema de pulso-eco para o qual a resposta ao impulso do transdutor é a entrada e os pulsos recebidos são as saídas. Este sistema pode ser decomposto em respostas ao caminho da propagação (filtro de propagação) e a resposta as falhas. O filtro de propagação representa os efeitos causados pela dependência da frequência em relação a absorção e ao espalhamento [62]. Estes efeitos podem ser observados em termos da dispersão de frequência, difração, deslocamento de fase e atenuação do pulso original. A resposta a falhas é observado em termos das reflexões, atenuação e inversão de fase do pulso original. O tempo de retorno do pulso pode ser utilizado para localizar a falha quando o caminho é homogêneo. A frequência central do pulso pode ser atribuída a resposta do filtro de propagação [63].

A modificação da frequência no meio de propagação é devido a dependência deste parâmetro com a absorção e o espalhamento, que são governados pela micro-estrutura do material [62]. O coeficiente de atenuação ultra-sônico caracteriza a dependência da frequência em relação a absorção e ao espalhamento.

Modelos de sinais paramétricos são utilizados para analisar pulsos ultra-sônicos. Estes modelos são sensíveis as características do sinal como fator de largura de banda, tempo de retorno, frequência central, amplitude e fase do pulso ultra-sônico. Muitas vantagens tem sido descobertas utilizando o modelo de sinais. Primeiro, estimativas de parâmetros com alta resolução podem ser encontrados. Segundo, a precisão da estimação pode ser avaliada. Terceiro, as relações analíticas entre os parâmetros do modelo e parâmetros físicos do sistema podem ser estabelecidos [63].

Em testes ultra-sônicos, os pulsos podem ser modelados pela equação (3.64) [61-63]:

$$S_G(\theta, t) = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t - \tau) + \varphi) \quad (3.64)$$

Com  $\theta = [\alpha \ \tau \ f_c \ \beta \ \varphi]$ , onde  $\alpha$  é o fator de largura de banda,  $\tau$  é o tempo de retorno,  $f_c$  é a frequência central,  $\beta$  é a amplitude,  $\varphi$  é a fase,  $\theta$  é o conjunto de parâmetros a serem estimados e  $t$  é o tempo. Onde  $S_G(\theta, t)$  é o modelo do pulso Gaussiano.

O fator de largura de banda determina a largura de faixa do pulso; o tempo de retorno está relacionado com a localização da superfície refletora; a frequência central é governada pela frequência dos deslocamentos no material. O pulso tem uma amplitude e uma fase de acordo com a impedância, tamanho e orientação da superfície refletora. Este modelo é utilizado para estimação de parâmetros com testes que utilizam o método do pulso-eco, ou seja, um transdutor que funciona como pulsador e receptor.

Considerando o efeito do ruído na estimação, um processo de ruído pode ser incluído ao modelo. O ruído pode ser detectado através de medições e caracterizado como um ruído gaussiano branco aditivo (WGN) [61-63]. Assim, o pulso ultra-sônico pode ser modelado por:

$$x_p(t) = S_G(\theta, t) + e_w(t) \quad (3.65)$$

onde:  $S_G(\cdot)$  denota o modelo do pulso Gaussiano (equação 3.64),  $e_w(t)$  denota um processo WGN e  $x_p(t)$  denota o pulso afetado pelo ruído.

Este modelo pode ser estendido para um modelo com múltiplos pulsos, para representar pulsos superpostos. Assumindo pulsos Gaussianos, um conjunto de pulsos superpostos pode ser modelado por M-pulsos Gaussianos de acordo com a equação (3.66) [61-63]:

$$y_p(t) = \sum_{m=1}^M S_G(\theta_m, t) + e_w(t) \quad (3.66)$$

Onde  $y_p(t)$  denota um conjunto de pulsos superpostos. Note que cada vetor paramétrico  $\theta_m$  define completamente a forma e localização do pulso correspondente.

O espectro de magnitude normalizado ( $\beta = 1$ ) e com fase zero ( $\varphi = 0$ ) para o pulso Gaussiano (equação 3.64) pode ser escrito de acordo com a equação (3.67) [61-63]:

$$|S_G(f)| = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left( e^{-\frac{\pi^2(f-f_c)^2}{\alpha}} + e^{-\frac{\pi^2(f+f_c)^2}{\alpha}} \right) \quad (3.67)$$

onde:  $f$  denota uma frequência variável e  $f_c$  denota a frequência central do pulso.

O espectro de energia obtido pelo quadrado da equação (3.67) é dado por [61-63]:

$$P_{SS}(f) = \frac{\pi}{4\alpha} \left( e^{-\frac{2\pi^2(f-f_c)^2}{\alpha}} + e^{-\frac{2\pi^2(f+f_c)^2}{\alpha}} + 2e^{-\frac{2\pi^2(f+f_c^2)}{\alpha}} e^{-\frac{2\pi^2 f^2}{\alpha}} \right) \quad (3.68)$$

Finalmente, a energia do pulso pode ser obtida integrando o espectro de energia na faixa de frequência  $[-\infty, \infty]$ :

$$E_S = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} (1 + e^{-\frac{2\pi^2 f_c^2}{\alpha}}) \quad (3.69)$$

Considera-se que o termo exponencial na equação (3.69) é desprezível para sinais onde a frequência central é muito maior que a largura de banda do sinal. Para o termo exponencial ser menor que 1% da energia, a condição  $f_c^2 \geq 0,24\alpha$  deve ser satisfeita. Baseado neste conceito e levando em conta a amplitude  $\beta$ , a fórmula da energia pode ser simplificada [62]:

$$E_S = \frac{\beta^2}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} \quad (3.70)$$

Note que a energia do pulso depende apenas da amplitude e do fator de largura de banda.

A relação sinal ruído (SNR) pode ser determinada explicitamente no caso do ruído (WGN) com variância  $\sigma_v^2$  de acordo com a equação (3.71):

$$SNR = 10 \log\left(\frac{E_S}{\sigma_v^2}\right) [dB] \quad (3.71)$$

A largura de banda do pulso pode ser deduzida a partir do espectro de energia (3.68). A maior parte da energia está confinada em torno da frequência central. Para um pulso Gaussiano, 98% da largura de banda que contem 98% do sinal de energia é dado pela equação (3.72) [62]:

$$BW_{98\%} = 0,382\sqrt{\alpha} \quad (3.72)$$

Para propósitos computacionais, o modelo de observação (equação 3.65) para um pulso ultra-sônico pode ser escrito na forma discreta de acordo com a equação (3.73) [61-63]:

$$x_p = S_G(\theta) + e_w \quad (3.73)$$

Com  $S_G(\theta)$  sendo um vetor de pulso Gaussiano definido pelo modelo da equação (3.74):

$$S_G(\theta, t(nT)) = \beta e^{-\alpha(t(nT)-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t(nT) - \tau) + \varphi) \quad (3.74)$$

---

para  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ , onde  $t(nT)$  são as amostras discretas do tempo  $t$  e  $T$  é o intervalo de amostragem. Os parâmetros do pulso são armazenados no vetor  $\theta_m$ .

### 3.7 Teoria sobre Wavelets (Ondaletas)

Usualmente os sinais são analisados nos domínios do tempo e da frequência. A análise no domínio do tempo verifica as modificações na forma do sinal com as mudanças no tempo, enquanto que a análise no domínio da frequência verifica as modificações na energia ou potência do sinal com as mudanças na frequência. Entretanto, para sinais não-estacionários, um método que possa combinar as análises no domínio do tempo com o domínio da frequência juntas é desejável, com isso a Wavelet é um método de análise de tempo-frequência com janelas ajustáveis que pode desempenhar este papel [64]. A energia é uma importante variável física na análise de sinais. A distribuição de energia com a mudança de tempo e frequência pode indicar as características principais de um sinal, e o uso de Wavelet pode auxiliar nesta análise [64].

Dado um sinal, a análise de Fourier facilmente determina as frequências e as amplitudes destas frequências, facilitando a avaliação das características do sinal. Entretanto a inversão de Fourier só é possível sob certas circunstâncias, pois este método não é utilizado para analisar sinais descontínuos. Nestes casos, a análise Wavelet é sempre mais efetiva, pois fornece uma técnica simples para lidar com aspectos locais de um sinal. A análise Wavelet também fornece um novo método para remoção de ruído do sinal que complementa os métodos clássicos de análise de Fourier. A análise de Fourier é muito efetiva em problemas que tratam com localização de frequência. As Wavelets, entretanto, são frequentemente muito eficazes na representação de sinais descontínuos, pois são desenvolvidas para capturar informações sobre uma grande faixa de escalas (frequências) [65].

As Wavelets podem ser utilizadas para analisar pequenos intervalos de tempo para componentes de alta frequência e longos intervalos de tempo para componentes de baixa frequência, melhorando assim a análise dos sinais com impulsos, oscilações localizadas e formas de ondas não periódicas [66].

As Wavelets são um conjunto de funções que podem ser usadas eficazmente em um grande número de situações, para representar de forma natural, fenômenos transitórios que resultam da dilatação e deslocamento de uma forma de onda original. Por exemplo, quando um pulso se propaga através da camada de um meio, devido à dispersão e as propriedades elétricas diferentes

---

das camadas, o pulso é dilatado e atrasado, devido à velocidade finita de propagação [67].

A Transformada Wavelet (TW) representa uma poderosa ferramenta para processamento de sinais com uma larga variedade de aplicações: acústica, comunicações, análise de transitórios, medicina e etc. A principal razão para o crescimento desta ferramenta é a capacidade da TW não somente para decompor um sinal em suas componentes de frequência, mas também, ao contrário da transformada de Fourier, fornece uma divisão não uniforme no domínio da frequência, uma vez que foca sua análise em pequenos intervalos de tempo para componentes de alta frequência e longos intervalos para baixas frequências. Estes atributos de resolução de frequência podem facilitar muito a análise do sinal e a detecção de características do sinal, o qual pode ser muito útil na caracterização de fontes de transitórios [68].

O sinal original é decomposto em suas sub-bandas ou níveis de uma Wavelet constituinte. Cada um destes níveis representa uma parte do sinal original de acordo com um determinado intervalo de tempo e uma banda de frequência específica. Estas bandas de frequência individuais são logaritmicamente espaçadas, diferentemente das que são uniformemente espaçadas como na análise de Fourier. Os sinais decompostos possuem uma poderosa localização de tempo-frequência, o qual é um dos principais benefícios fornecidos pela TW. O resultado da decomposição dos sinais pode então ser analisado em ambos os domínios de tempo e frequência [68].

A utilização de Wavelets baseia-se na análise multiresolução, que se refere ao procedimento para obter aproximações em passa-baixa e detalhes em passa-alta a partir do sinal original. Uma aproximação é uma representação em baixa resolução do sinal original, enquanto que um detalhe é a diferença entre duas representações de baixas resoluções sucessivas do sinal original. Uma aproximação contém a tendência geral do sinal original enquanto um detalhe inclui conteúdos de alta frequência do sinal original. Aproximações e detalhes são obtidos através de sucessões de processos de convolução. O sinal original é dividido em diferentes escalas de resolução (frequências), diferente do caso da análise de Fourier [68].

O algoritmo de decomposição multiresolução está ilustrado na Figura 3.2, onde três níveis de decomposição são apresentados como um exemplo para ilustração.

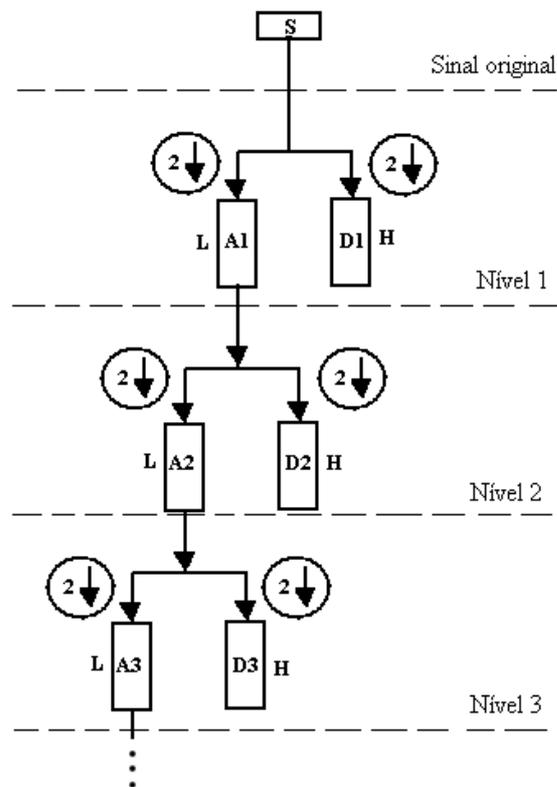


Figura 3.2: Exemplo de decomposição multiresolução.

Os detalhes e aproximações do sinal original  $S$  são obtidos passando através de um banco de filtros, o qual consiste de filtros passa-baixa ( $L$ ) e passa-alta ( $H$ ). Um filtro passa-baixa remove as componentes de alta frequência, enquanto o filtro passa-alta captura o conteúdo de alta frequência do sinal sob análise. De acordo com a Figura 3.2, o procedimento de decomposição multiresolução pode ser definido pelas equações (3.75) e (3.76) [68]:

$$D_j(n) = \sum_k h(k)A_{j-1}(n-k) \quad (3.75)$$

$$A_j(n) = \sum_k l(k)A_{j-1}(n-k) \quad (3.76)$$

onde:  $l$  e  $h$  são os vetores filtros passa-baixa e passa-alta respectivamente,  $D_j$  e  $A_j$  são os detalhes e aproximações do sinal original na resolução  $j$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ , respectivamente,  $A_{j-1}$  é a aproximação no nível imediatamente acima do nível  $j$ , e  $k = 1, 2, \dots, K$ , onde  $k$  é o comprimento do vetor filtro.

Para se ter uma representação não redundante e uma reconstrução única do sinal origi-

nal, bancos de filtros ortogonais são necessários. A TW e a decomposição multiresolução são intimamente relacionadas. Também, como ilustrado na Figura 3.2, a decomposição Wavelet é acompanhada pela inclusão da operação de amostragem abaixo na análise multiresolução. O número máximo de níveis de decomposição da Wavelet para TW é determinado pelo sinal original, pela Wavelet particular selecionada, e pelo nível de detalhes requerido. Os filtros passa-baixa e passa-alta são determinados pela função escala e pela função Wavelet, respectivamente [68].

Algumas Wavelets freqüentemente usadas para processamentos de sinais são Daubchies, Morlets, Haar e Symlets. Estas wavelets exibem diferentes atributos e critérios de desempenho quando aplicadas em problemas específicos, como na detecção de transitórios, compressão de sinais e remoção de ruídos. Assim não existem critérios definitivos para seleção de Wavelets, a melhor escolha é uma Wavelet que exiba melhor o fenômeno sob estudo [68].

Quando a TW é aplicada, normalmente utiliza-se uma linguagem de programação básica ou uma ferramenta de *software* desenvolvida para este propósito. As linguagens C, C++ ou mais recentemente Java, são escolhidas mais freqüentemente pelos desenvolvedores para análise da TW [68].

### 3.7.1 Conceitos básicos sobre Wavelets

Existem duas versões diferentes da Transformada Wavelet (TW): a contínua e a discreta.

- A Transformada Wavelet Contínua (TWC) faz o mapeamento de uma função de uma variável contínua e uma função de duas variáveis contínuas;
- A Transformada Wavelet Discreta (TWD) decompõe um sinal discretizado em diferentes níveis de resolução. Esta faz o mapeamento de uma seqüência de números em outra seqüência de números [66].

#### Transformada Wavelet Contínua (TWC)

A análise Wavelet emprega um protótipo de função chamada de Wavelet mãe. Esta função tem média zero e parte central oscilante, a qual decai para zero em ambos os lados de sua trajetória. Matematicamente, a Transformada Wavelet Contínua de um sinal  $x(t)$  com respeito a Wavelet mãe  $\psi(t)$  é definida por [69]:

$$TWC(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3.77)$$

onde:  $a$  é a dilatação ou fator de escala e  $b$  é o fator de translação, e ambas as variáveis são contínuas.

O sinal original no domínio do tempo  $x(t)$ , com uma dimensão, é mapeado para uma nova função no espaço, de dimensão dois, através dos coeficientes de escala e de translação pela TW. O conjunto de todos os coeficientes  $TWC(a, b)$  associados a um particular sinal é a representação do sinal original  $x(t)$  com respeito a Wavelet mãe  $\psi(t)$  [66].

Pode-se visualizar a Wavelet mãe como uma função janela. O fator de escala  $a$  e o tamanho da janela são interdependentes, onde menores escalas implicam em menores janelas. Com isso pode-se analisar componentes de banda estreita de frequência de um sinal com um pequeno fator de escala e componentes de banda larga de frequência com fatores de escala maiores, permitindo captar todas as características de um sinal particular.

Existem duas propriedades importantes da TW a saber:

### Escalonamento

Escalonar uma Wavelet significa simplesmente dilatá-la ou contraí-la, e isso é obtido através da variação do fator de escala [69]. Quanto menor o fator de escala, mais contraída será a Wavelet. Na análise Wavelet, a escala é relacionada com a frequência do sinal, assim:

- Um baixo valor de escala implica em uma Wavelet contraída, com detalhes que mudam rapidamente e com alta frequência;
- Um alto valor de escala implica em uma Wavelet dilatada, com detalhes que mudam vagarosamente e com baixa frequência.

### Translação

Transladar uma Wavelet significa atrasá-la ou adiantá-la em relação ao eixo das abscissas, que é realizado matematicamente quando se escreve  $f(x - k)$  como sendo um atraso na função  $f$  por um fator  $k$  [69].

O exemplo de uma Wavelet com diferentes valores de escalonamento e translação estão apresentados na Figura 3.3. Nesta figura são apresentados diferentes valores para os parâmetros  $a$  e  $b$  que estão diretamente relacionados com o escalonamento e com a translação.

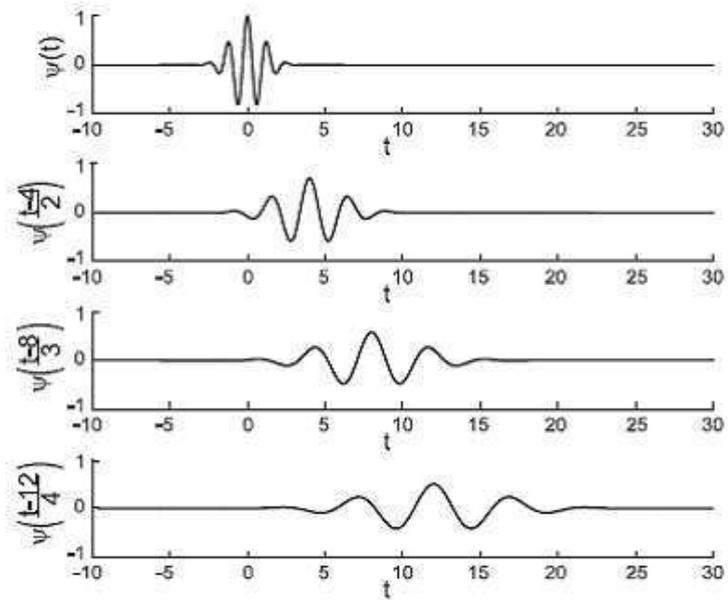


Figura 3.3: Exemplo de uma Wavelet com diferentes valores de escala e fator de translação.

A TW engloba um infinito conjunto de Wavelets devido à necessidade da análise multi-resolução. Por exemplo, uma grande família de Wavelets pode ser gerada a partir de uma Wavelet mãe variando os fatores de escala e translação. O número de coeficientes e o nível de iterações geram uma Wavelet filha dentro de uma família que é usada para distinguir de outra Wavelet na mesma família. Existem muitos tipos de Wavelets mãe que podem ser empregadas na prática. Para escolher a melhor, os atributos das diferentes Wavelets mães necessitam ser considerados [66].

A principal característica das Wavelets é a oscilação e o comportamento de decaimento rápido que vem com a localização no tempo e frequência. Geralmente, Wavelets suaves indicam uma melhor resolução de frequência que Wavelets com passos agudos; o contrário se aplica para resolução de tempo. Outro importante critério é uma rápida computação das Wavelets filhas escaladas. Uma das mais largamente aplicadas Wavelets mãe em diversas aplicações é a Daubechies, que é idealmente adaptada para detectar pequenas amplitudes, curta duração, rápido decaimento e oscilações para diversos tipos de sinais [66].

## Transformada Wavelet Discreta (TWD)

A Transformada Wavelet Contínua tem uma versão digitalmente implementável, denotada como Transformada Wavelet Discreta, que é definida por [69]:

$$TWD(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (3.78)$$

onde:  $\psi(\cdot)$  é a Wavelet mãe e os parâmetros de escala e translação  $a$  e  $b$  são funções de um parâmetro inteiro  $m$ , isto é  $a = a_0^m$  e  $b = nb_0 a_0^m$ , permitindo uma expansão da família originada pela Wavelet mãe, gerando Wavelets filhas. Nesta equação o fator  $k$  é uma variável inteira referente a um número particular de amostras de um determinado sinal de entrada.

## Implementação da TWD

Por uma simples mudança nas variáveis  $n$ ,  $k$  e reescrevendo a equação da TWD, temos [66]:

$$TWD(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k x(k) \psi(a_0^{-m} n - kb_0) \quad (3.79)$$

Observando melhor esta equação, nota-se que existe uma grande similaridade com a equação de convolução para a resposta ao impulso finito (FIR) dos filtros digitais, a saber:

$$y(n) = \frac{1}{c} \sum_k x(k) h(n - k) \quad (3.80)$$

onde:  $h(n - k)$  é a resposta ao impulso do filtro,  $y(n)$  é o sinal de saída e  $x(k)$  é o sinal de entrada.

Comparando as equações (3.79) e (3.80), fica evidente que a resposta ao impulso do filtro na equação da TWD é  $\psi(a_0^{-m} n - kb_0)$ .

Pela seleção de  $a_0 = 2$  ou  $(a_0^{-m} = 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots)$  e  $b_0 = 1$ , a TWD pode ser implementada pelo uso de filtros com multi-estágios com a Wavelet mãe como o filtro passa-baixa  $l(n)$  e sua dual como o filtro passa-alta  $h(n)$  como ilustrado na Figura 3.4.

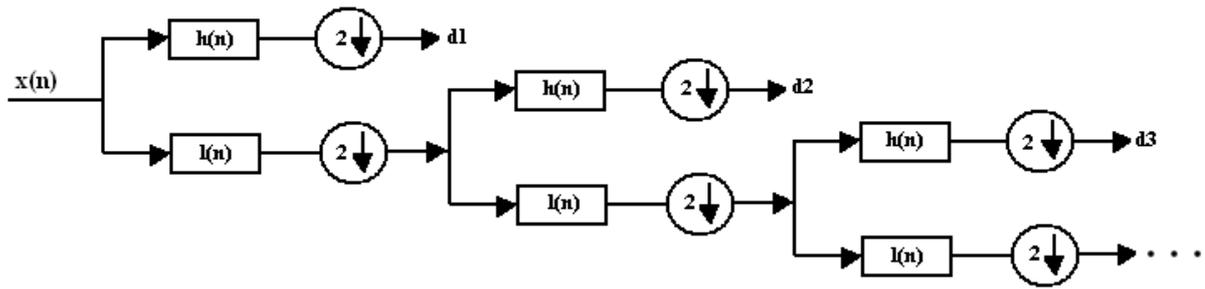


Figura 3.4: Diagrama de implementação da TWD.

A partir do exemplo considerado, uma amostragem abaixo da saída do filtro passa-baixa  $l(n)$  por um fator de 2 ( $\downarrow 2$ ) eficazmente escala a Wavelet por um fator de 2 para o próximo estágio, assim simplificando o processo de dilatação [66].

É importante notar que os filtros passa-alta e passa-baixa não são independentes um do outro, mas são relacionados por [66]:

$$h[L - 1 - n] = (-1)^n l(n) \quad (3.81)$$

onde:  $L$  é a ordem do filtro. Estes filtros são chamados filtros em espelho e quadratura.

A implementação da TWD com um banco de filtros é computacionalmente eficiente. As saídas dos filtros passa-alta na Figura 3.4 fornecem as versões de detalhes das componentes de alta frequência do sinal. Como pode ser visto, as componentes de baixa frequência são divididas para adquirir os outros detalhes mais adiante no sinal de saída. Utilizando esta técnica, Wavelets podem ser implementadas. Por exemplo se o sinal original é amostrado a  $F_s$  Hz, então a mais alta frequência que o sinal amostrado pode representar é  $F_s/2$  (baseado no teorema de Nyquist). Isto pode ser visto como a saída do filtro passa-alta, o qual é o primeiro detalhe ( $d1$ ) na Figura 3.4, e o primeiro detalhe captura a banda de frequência entre  $F_s/4$  e  $F_s/2$ . Da mesma forma, o segundo detalhe poderá capturar a banda de frequência entre  $F_s/8$  e  $F_s/4$  e assim por diante. Associado com a análise Wavelet, ambas as características de alta e baixa frequência de magnitudes variadas em diferentes níveis de detalhes podem ser analisadas [66].

### 3.7.2 Características das Wavelets

Para uma função ser chamada de Wavelet ela deve satisfazer as seguintes condições [70]:

1. A integral da função Wavelet, usualmente denotada por  $\psi$ , deve ser zero:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3.82)$$

Esta condição assegura que a função Wavelet tem uma forma de onda própria e é conhecida como condição de admissibilidade.

2. A função Wavelet deve ter energia unitária:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1 \quad (3.83)$$

Esta condição assegura que a função Wavelet se mantém compacta ou tem uma amplitude que decai rapidamente, garantindo uma forma bem definida.

A transformada Wavelet é uma transformada linear e covariante sob uma operação de translação e dilatação. A transformada Wavelet pode ser usada na análise de sinais não estacionários para obter informações sobre a frequência ou variações de escala dos sinais e para detectar suas estruturas de localização no tempo e/ou espaço. A localização tempo/espaço ocorre devido à função Wavelet ser definida em um intervalo de tempo finito. Em cada nível de escala todas as funções Wavelet têm a mesma forma, modificando apenas seus pontos de localização. Na derivação da TWC, muito das informações relacionadas com as escalas ou tempo são redundantes. Estes procedimentos resultam em grandes custos computacionais, que em alguns casos podem ser resolvidos usando uma Wavelet discreta (TWD) adequada, que utiliza valores discretos de escala ( $j$ ) e translação ( $k$ ) [70].

Como uma propriedade da análise Wavelet, é possível observar que as amplitudes dos coeficientes Wavelet estão associados com variações abruptas do sinal ou com detalhes de alta frequência [71]. Por outro lado, a transformada de Fourier não é capaz de reconhecer estas regiões de transição. Na análise de Fourier apenas as presenças das frequências envolvidas são detectadas e as informações sobre a localização espacial destas frequências não são dadas.

É possível construir funções Wavelet usando uma ferramenta matemática conhecida como análise multiresolução. Nesta técnica, uma função Wavelet mãe é gerada a partir de uma função escala. Esta função obedece a relação de escala [70]:

$$\phi(x) = 2 \sum_k l(k) \phi(2x - k) \quad (3.84)$$

onde:  $\phi(x)$  é conhecida como a função escala, e  $l(k)$  é um filtro passa-baixa. Então, as funções Wavelet mãe são construídas como:

$$\psi(x) = \sum_k h(k) \phi(2x - k) \quad (3.85)$$

onde:  $h(k) = (-1)^{k+1} l(1 - k)$  é um filtro passa-alta.

A partir desta Wavelet mãe, é possível construir outras funções  $\psi_k^j$  que podem ser dilatadas e contraídas. Este processo permite a construção de uma base com suporte compacto e grau de suavidade arbitrário. As funções formam um sistema ortogonal, isto é:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(2^{-j}x - k) \psi(2^{-p}x - n) dx = \begin{cases} 2^{-j} & \text{se } j = p, k = n \\ 0 & \text{se } j \neq p, k \neq n \end{cases} \quad (3.86)$$

Isto significa que informações redundantes não são armazenadas. As funções Wavelet ortogonais Daubechies são exemplos deste tipo de construção. Estas funções não têm expressões analíticas e não são simétricas. Os coeficientes  $l(k)$  são zero para  $k < 0$  e para  $k \geq 2K$ , onde  $K$  está relacionado com a ordem de suavidade da Wavelet. O suporte (intervalo determinado) de  $\phi = \phi_k$  é  $[0, (K/2) - 1]$ .

### 3.7.3 Wavelet Haar

Para entender como a análise Wavelet funciona, é melhor iniciar com a mais simples Wavelet, a Wavelet Haar  $\psi$  que é definida por [65]:

$$\psi(x) = 1_{[0, \frac{1}{2})}(x) - 1_{[\frac{1}{2}, 1)}(x) \quad (3.87)$$

Esta wavelet é 0 fora do intervalo  $[0, 1)$ , com isso ela é bem localizada no tempo e satisfaz as condições:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0, \quad (3.88a)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1 \quad (3.88b)$$

A Wavelet Haar  $\psi(x)$  é fortemente relacionada com a função  $\phi(x)$  definida por:

$$\phi(x) = 1_{[0,1)}(x) \quad (3.89)$$

Esta função  $\phi(x)$  é chamada de função escala Haar. Claramente, a Wavelet Haar e a função escala satisfazem as identidades:

$$\psi(x) = \phi(2x) - \phi(2x - 1), \quad (3.90a)$$

$$\phi(x) = \phi(2x) + \phi(2x - 1) \quad (3.90b)$$

E a função escala satisfaz as condições:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) dx = 1, \quad (3.91a)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\phi(x)|^2 dx = 1 \quad (3.91b)$$

A Wavelet Haar  $\psi(x)$  gera o sistema de funções  $(2^{\frac{n}{2}}x - k)$ .

A TWD usando a Wavelet Haar detecta variações abruptas do sinal, isto é, uma característica de localização no espaço físico [70].

A maior desvantagem da Wavelet Haar é sua descontinuidade. Em primeiro lugar, ela é insatisfatória no uso de funções descontínuas para aproximarem funções contínuas. Até mesmo com sinais discretos pode haver saltos indesejáveis nos valores das somas parciais das séries Haar. Desta forma é necessário a utilização de uma Wavelet que seja contínua. Com isso surgem as Wavelets Daubechies, que são contínuas [65].

### 3.7.4 Wavelets Daubechies

Generalizando a partir do caso da Wavelet Haar, é necessário que  $\phi(x)$  e  $\psi(x)$  satisfaçam as condições:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) dx = 1, \quad (3.92a)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\phi(x)|^2 dx = 1, \quad (3.92b)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1 \quad (3.92c)$$

Desta forma:

$$\phi(x) = \sum_k c_k \sqrt{2} \phi(2x - k) \quad (3.93)$$

Para algumas constantes  $c_k$ . A Wavelet  $\psi(x)$ , para o qual  $\psi(x - k)$  atravessa o subespaço de Wavelet  $W_0$ , pode ser definida por [65]:

$$\psi(x) = \sum_k (-1)^k c_{1-k} \sqrt{2} \phi(2x - k) \quad (3.94)$$

A ortogonalidade de  $\phi(x)$  e  $\psi(x)$  leva a seguinte equação:

$$\sum_k (-1)^k c_{1-k} c_k = 0 \quad (3.95)$$

Combinando a equação (3.93) com as duas primeiras integrais em (3.92), temos que:

$$\sum_k c_k = \sqrt{2}, \quad (3.96a)$$

$$\sum_k |c_k|^2 = 1 \quad (3.96b)$$

Similarmente, com o uso da equação (3.94), obtemos:

$$\sum_k (-1)^k c_k = 0, \quad (3.97a)$$

$$\sum_k k (-1)^k c_k = 0 \quad (3.97b)$$

Com isso existe um conjunto finito de coeficientes que resolve as equações em (3.96) e (3.97), a saber:

$$c_0 = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, c_1 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, c_2 = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, c_3 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad (3.98)$$

Com todos os outros  $c_k = 0$ . Usando estes valores de  $c_k$ , a seguinte solução iterativa de (3.93)

$$\phi_0(x) = 1_{[0,1)}(x), \phi_n(x) = \sum_k c_k \sqrt{2} \phi_{n-1}(2x - k), \quad (3.99)$$

para  $n \geq 1$ , converge para uma função contínua  $\phi$  contida no intervalo  $[0, 3]$ . Segue então da equação (3.94) que a Wavelet  $\psi(x)$  é também contínua e compactamente contida no intervalo  $[0, 3]$ . Esta Wavelet  $\psi(x)$  é chamada de Daub4. O conjunto de coeficientes  $c_k$  em (3.98) é o menor conjunto de coeficientes que produz uma função escala contínua contida compactamente [65].

Um assunto que é sempre emergente na aplicação das técnicas Wavelets é a escolha da função Wavelet apropriada para um sinal específico. Algumas recomendações podem ser úteis e através de alguns procedimentos podem ser seguidos vários caminhos [70]:

- A forma da função Wavelet escolhida deve traduzir as características da série no tempo. Por exemplo, para representar uma série temporal com variações abruptas, a Wavelet Haar pode ser a mais conveniente. Na análise de séries temporais com variações suaves, a Wavelet Morlet pode ser recomendada.
- Quando a análise é focada nas mudanças de amplitude e fase, uma Wavelet complexa, como a Wavelet Morlet, pode ser a mais apropriada. Esta ajuda a retratar o comportamento oscilatório dos dados.
- Em uma análise exploratória de dados, funções Wavelet não ortogonais podem ser úteis, devido elas permitirem uma redundância na informação.
- Para sintetizar dados e fazer compressões, funções Wavelet ortogonais são usadas, uma vez que elas representam o sinal em uma forma mais compacta.
- Quando uma informação quantitativa sobre um processo é necessária, funções Wavelets ortogonais são a melhor escolha. Quando apenas o espectro da Wavelet é analisado quantitativamente, esta escolha não parece afetar os resultados.

### 3.7.5 Interpretação da TWD pela teoria de filtros

Considere o sinal amostrado  $x(n)$  com uma faixa limitada, e assuma que ele é amostrado a  $f = 1$  Hz. Então o intervalo de amostragem é  $\Delta t = 1$  s. A partir do critério de amostragem de Nyquist, é então necessário que o sinal  $x(n)$  seja limitado em banda por  $1/2$  Hz, então ele pode ser amostrado em 2 vezes sua largura de banda pela frequência de Nyquist sem *aliasing* (interferência). A largura de banda do sinal (em frequência angular) é dada por [67]:

$$\omega_b = 2\pi f_b = 2\pi 1/2 = \pi \quad (3.100)$$

E a frequência angular de amostragem,  $\omega_s$  é dada por:

$$\omega_s = 2\pi \quad (3.101)$$

Agora considere que o sinal  $x(n)$  é filtrado por um filtro passa-baixa,  $L(z)$ , com uma largura de banda  $\pi/2$  ( $0 \leq \omega \leq \pi/2$ ), e por um filtro passa-alta,  $H(z)$ , com largura de banda  $\pi/2$  ( $\pi/2 \leq \omega \leq \pi$ ). Considere  $u'(n)$  como o sinal na saída do filtro passa-baixa e  $v'(n)$  como sendo o sinal na saída do filtro passa-alta. O princípio de filtragem em sub-bandas está ilustrado na Figura 3.5.

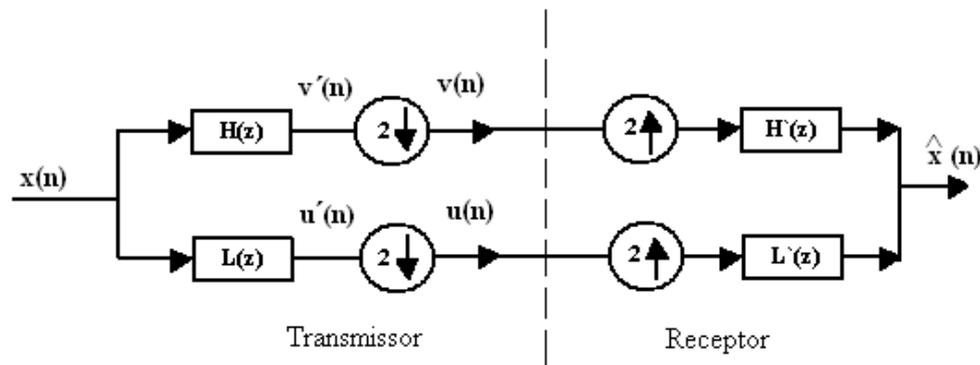


Figura 3.5: Esquema de filtragem em sub-bandas.

Uma vez que a largura de banda dos sinais  $u'(n)$  e  $v'(n)$  é reduzido por um fator de 2, estes sinais podem ser decimados por um fator de 2 sem *aliasing*. Isto é equivalente a reduzir a taxa de amostragem. A decimação ou amostragem abaixo por um fator de 2, implica que amostras alternadas são descartadas, e os dados são comprimidos. O objetivo da decimação é reduzir a

taxa de amostragem e, assim, a largura de banda do sinal. A amostragem abaixo é possível devido a  $u'(n)$  e  $v'(n)$  terem uma largura de banda efetiva de  $f = 1/4$  ou  $\omega = \pi/2$ , uma vez que foram filtrados [67].

Depois, ambos os sinais  $u'(n)$  e  $v'(n)$  são amostrados abaixo por um fator de 2, resultando em  $u(n)$  e  $v(n)$  com ilustrado na Figura 3.5.

Os filtros  $L(z)$  e  $H(z)$  são chamados filtros em espelho e quadratura, devido eles serem simétricos em torno do ponto  $\pi/2$  como ilustrado na Figura 3.6.

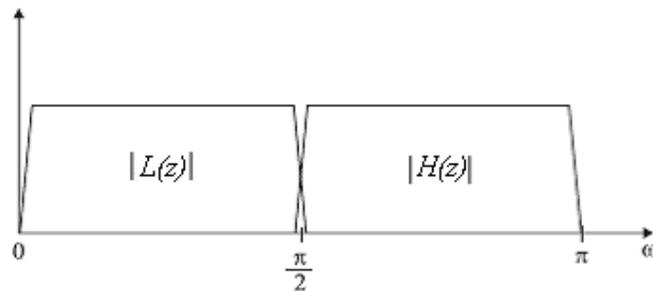


Figura 3.6: Espectro de frequência dos filtros  $L(z)$  e  $H(z)$ .

### 3.7.6 Análise da densidade de energia-tempo baseada na transformada Wavelet

A energia é uma importante variável na análise de sinais. A distribuição da energia com a mudança de tempo e frequência podem mostrar as características do sinal, como modificações na amplitude e frequência. Com o uso de Wavelets pode-se analisar a distribuição de energia do sinal com a mudança do tempo em diferentes faixas de frequência [64].

O principal objetivo da análise de sinais é encontrar um método de transformada simples e eficiente para representar as principais características do sinal. Usualmente analisa-se o sinal no domínio do tempo e da frequência. Entretanto, para sinais não estacionários, um método que possa combinar a análise no domínio do tempo com a análise no domínio da frequência é desejável. A FFT pode apenas fornecer a distribuição de energia com a mudança do tempo ou frequência respectivamente. A transformada de Fourier janelada (WFT) mostra um sinal no tempo em um plano de tempo-frequência em comum. Entretanto, uma vez que a função janela é escolhida, o tamanho da janela de tempo-frequência é fixado, então, as resoluções de tempo e frequência são os mesmos para todos os sinais incluindo diferentes escalas de tempo. A Wavelet é

um método de análise de tempo-frequência com janela ajustável. Com a característica de refletir a informação localizada no domínio do tempo e frequência simultaneamente, a transformada Wavelet tem sido extensivamente aplicada na análise de sinais [64].

Dados  $\psi(t)$  e  $\hat{\psi}(0) = 0$ , então a família de funções  $\psi_{a,b}(t)$  é produzida por:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-(1/2)} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a \neq 0 \quad (3.102)$$

onde:  $\psi_{a,b}(t)$  é chamada Wavelet de análise ou Wavelet contínua;  $\psi(t)$  é chamada Wavelet básica ou Wavelet mãe e  $\hat{\psi}(\omega)$  é a transformada de Fourier de  $\psi(t)$ ;  $a$  é o parâmetro de escala e  $b$  é o parâmetro de tempo.

Se uma função  $f(t)$  possui energia finita, a transformada Wavelet contínua da função  $f(t)$  é definida por [64]:

$$W_{f(a,b)} = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = |a|^{-(1/2)} \int_R f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3.103)$$

A transformada Wavelet é isométrica, isto quer dizer que a transformada Wavelet de  $f(t)$  possui conservação de energia, e então a seguinte fórmula pode ser obtida:

$$\int_R |f(t)|^2 dt = \frac{1}{C_\psi} \int_R \int_R |W_{f(a,b)}|^2 \frac{dad b}{a^2} \quad (3.104)$$

Onde:

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3.105)$$

é tomada como a condição de admissibilidade.

A partir da característica isométrica da Wavelet, obtém-se a seguinte expressão [64]:

$$\langle f(t)f(t) \rangle = \int_R |f(t)|^2 dt = \frac{1}{C_\psi} \int_R a^{-2} da \int_R |W_{f(a,b)}|^2 db \quad (3.106)$$

Onde, devido a limitação do princípio da incerteza de Heisemberg (não se pode discutir densidade de energia instantânea em uma certa frequência ou um certo instante de tempo),  $|W_{f(a,b)}|^2 / C_\psi a^2$  não pode ser tomada como uma densidade instantânea. Entretanto,  $|W_{f(a,b)}|^2 / C_\psi a^2$  pode ser tomada como a função de densidade de energia no plano  $(a, b)$ . Isto quer dizer que  $|W_{f(a,b)}|^2 / C_\psi a^2$  fornece a energia no espaço  $(a \pm \Delta a, b \pm \Delta b)$ . Então, a equação (3.106) pode ser escrita como:

$$\int_R |f(t)|^2 dt = \int_R E(b) db \quad (3.107)$$

Onde:

$$E(b) = \frac{1}{C_\psi} \int_R \frac{|W_{f(a,b)}|^2}{a^2} da \quad (3.108)$$

A equação (3.108) fornece o valor da energia do sinal no espaço de tempo  $b \pm \Delta b$ .  $E(b)$  é chamada função densidade de energia-tempo. Ela reflete a distribuição da energia do sinal em todas as faixas de frequência com a mudança no parâmetro de tempo  $b$ . Na equação (3.109) é apresentada a distribuição da energia do sinal na faixa de integração  $[a_1, a_2]$  com a mudança do parâmetro de tempo  $b$  [64]:

$$E'(b) = \frac{1}{C_\psi} \int_{a_1}^{a_2} \frac{|W_{f(a,b)}|^2}{a^2} da \quad (3.109)$$

$E'(b)$  é chamada de função densidade de energia-tempo local e ela mostra toda energia do sinal na faixa a partir da escala (frequência)  $a_1$  até a escala (frequência)  $a_2$ . Pela escolha de diferentes valores para  $a_1$  e  $a_2$ , a distribuição de energia do sinal em diferentes bandas com a mudança do tempo pode ser obtida.

### 3.8 Teste do impacto do martelo

Para medir os parâmetros de uma estrutura é necessário utilizar ferramentas experimentais para facilitar o controle e a repetibilidade das medidas de vibrações. Usualmente isto é feito com o uso do impacto do martelo. A força aplicada é medida no ponto de excitação por uma célula de carga, permitindo a normalização da resposta da vibração medida para encontrar as funções de resposta em frequência [6].

Uma vez que a resposta ao impulso de um sistema é um sinal transitório e não-estacionário, a diferença no tempo de duração faz com que o espectro da resposta ao impulso unitário do sistema não seja único. Isto significa que as amplitudes e fases da função de resposta em frequência obtida pelo teste de impacto do martelo dependem do tempo de duração do impacto [7].

Testes com impacto do martelo têm sido usados em muitas áreas da engenharia para analisar funções de resposta em frequência (FRF) devido a sua conveniência e simplicidade dos

experimentos, bem como a validade dos procedimentos de análise [8-9].

Quando o sistema é excitado por um impacto de um martelo, o sistema vibra por um momento e reduz sua vibração até parar. De fato, o tempo de duração da vibração livre depende das características físicas do sistema, especialmente do coeficiente de amortecimento [7].

É muito útil analisar testes com medições da frequência natural para detectarem falhas em estruturas. Esta técnica consiste em comparar as frequências naturais obtidas a partir da análise de elementos finitos com as frequências medidas [10], [72].

A distribuição de pressão em uma estrutura vibrante é não linear e é diferente para cada modo de vibração. Desta forma, uma falha local afeta cada modo diferentemente dependendo da localização da falha. Alguns métodos para detecção de falhas em vigas são baseados nas modificações nas frequências naturais e nos modos de forma [73].

Modificações nas frequências naturais são um dos indicadores clássicos de falhas. Também são utilizados modos de forma que analisam as estruturas sem e com falhas para localização de defeitos [74]. Mais recentemente a detecção de falhas no domínio do tempo tem sido estudada utilizando históricos de tempo da resposta de vibração da estrutura para identificação de falhas [74].

Tem sido demonstrado que as falhas reduzem as frequências naturais da estrutura e com isso pode ser usado para detectar o tamanho da falha e sua localização. Isto motiva a análise dinâmica de estruturas com falhas [75-76].

A excitação por impulso é uma técnica primária usada em testes convencionais com vibração para determinar o comportamento dinâmico de estruturas. O impacto de um martelo é usado para gerar a excitação por impulso após golpear a estrutura. O impulso com uma amplitude específica  $A_e$  e com uma duração  $\Delta t_i$  pode excitar todos os modos de vibração da estrutura dentro de uma certa faixa de frequência. Para uma carga constante, a faixa de frequência efetiva é inversamente proporcional à duração  $\Delta t_i$ . É necessário induzir um pulso com um menor  $\Delta t_i$  para aumentar a faixa de frequência do teste [77].

Em muitas situações a carga atuando sobre uma estrutura é dinâmica. Análises de vibrações livres de elementos estruturais são desenvolvidos extensivamente. Como a resposta do sistema não depende apenas dos parâmetros do sistema como massa, dureza e umidade, mas também da duração do impulso e do ponto de aplicação da carga, vários estudos tem sido desenvolvidos para investigar a influência destes parâmetros na detecção de falhas em estruturas [8].

Alguns trabalhos têm sido dedicados a resolver o problema da detecção e localização de

falhas em estruturas elásticas pelo uso de modificações nos seus parâmetros modais, especificamente, as frequências naturais, amortecimento modal e modos de forma associados. As frequências naturais são menos afetadas por ruídos de medição e podem geralmente ser medidas com boa precisão [78].

A ocorrência de falhas em uma estrutura produz mudanças em suas características dinâmicas como frequências naturais, modos de forma, amortecimento modal, resposta ao impulso e funções de resposta em frequência. Um entendimento destas modificações pode levar a detecção, localização e caracterização do tamanho da falha. O princípio fundamental é comparar o comportamento da estrutura nos estados sem falhas e com falhas. O problema de detecção de falhas tem sido discutido como um problema de reconhecimento de padrões estatísticos e utiliza a análise de múltiplas assinaturas do sistema. Alguns estudos mostram que mais de uma frequência natural são investigadas para detecção com sucesso das falhas [79-80].

### 3.8.1 O modelo do impacto do martelo

O impacto do martelo pode ser modelado pela análise da interação mecânica entre a estrutura sob teste e o martelo. Na Figura 3.7 está ilustrada uma representação da estrutura usada para provocar as vibrações utilizando o martelo. A força aplicada com o impacto provoca as vibrações que são detectadas pelo sistema de detecção.

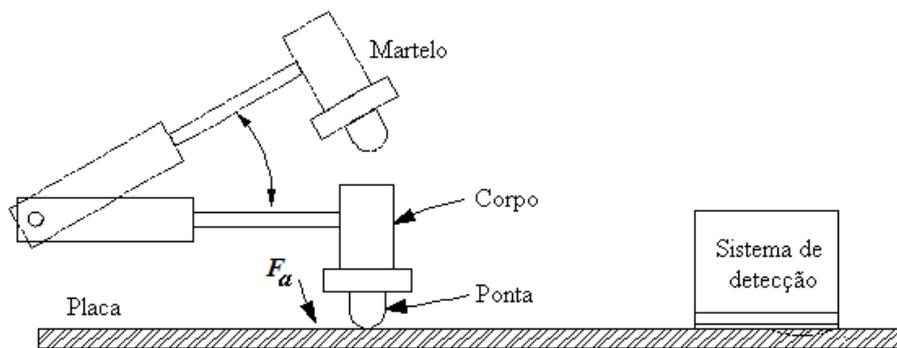


Figura 3.7: Representação da estrutura com o martelo.

Um modelo reduzido, com um grau de liberdade, pode ser usado para descrever o comportamento da vibração com o impacto do martelo, como ilustrado na Figura 3.8. A ponta do martelo é representada por um elemento com constante de dureza  $k_1$  e uma viscosidade com

um coeficiente de amortecimento  $c_1$ . As massas da ponta do martelo e do corpo do martelo são representadas pela massa  $m_1$ . O deslocamento da massa é  $x_1$  [81].

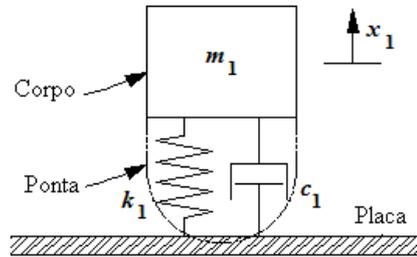


Figura 3.8: Diagrama equivalente do modelo de impacto do martelo.

Os valores apropriados para  $k_1$ ,  $c_1$  e  $m_1$  são determinados através de curvas com informações da amplitude da força de impacto em função do tempo. A força aplicada sobre a placa [81] é encontrada de acordo com a equação (3.110):

$$F_a = k_1 x_1 + c_1 dx/dt \quad (3.110)$$

onde:  $F_a$  é a força aplicada,  $k_1$  é a constante de dureza do material,  $c_1$  é o coeficiente de amortecimento do martelo e  $x_1$  é o deslocamento.

As condições iniciais em  $t = 0$  são  $x_1(0) = 0$  e  $dx/dt(0) = v_0$ , onde  $v_0$  é a velocidade de impacto.

Uma vez que a força é nula no início do impacto, obtém-se

$$F_a(0) = c_1 v_0 \cong 0 \quad (3.111)$$

o qual conduz para um pequeno valor do parâmetro de amortecimento  $c_1$ .

Durante a fase de impacto, o sistema é representado como um acoplamento entre o martelo e a estrutura. No fim do impacto, o martelo perde o contato com a estrutura, e esta vibra livremente de acordo com suas frequências naturais [81]. A constante de dureza  $k_1$  e o coeficiente de amortecimento  $c_1$  influenciam diretamente na amplitude e no tempo de decaimento das vibrações [11].

### 3.8.2 Uso de vibrações livres para determinação das propriedades de um sistema

Pode-se determinar a frequência natural ( $\omega_n$ ) e o coeficiente de amortecimento ( $\zeta$ ) de uma estrutura com o modelo do sistema, utilizando a resposta de vibração livre [81], com o uso de acelerômetros em pontos apropriados da estrutura sob teste. Então utiliza-se o impacto do martelo para excitar um modo particular de vibração. Os acelerômetros são usados para determinar os deslocamentos no ponto onde a estrutura foi excitada, ou seja, no ponto do impacto. Os resultados podem ser obtidos através de um gráfico similar ao apresentado na Figura 3.9.

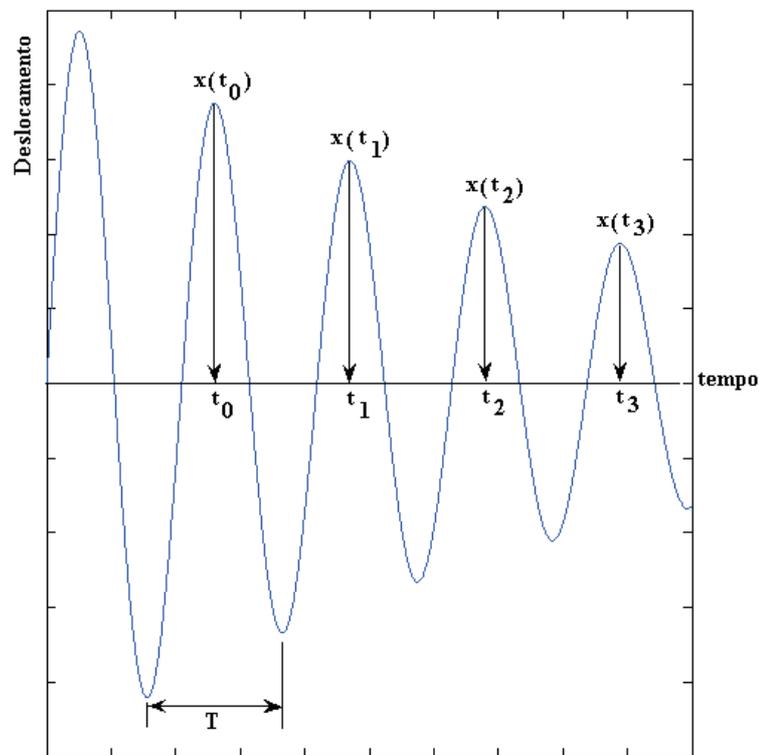


Figura 3.9: Representação de um sinal com testes de vibração.

As seguintes medidas podem ser obtidas a partir do gráfico:

1. Período de oscilação ( $T$ ): É definido como o tempo entre dois picos ou dois vales.

$$T = \frac{t_n - t_0}{n} \quad (3.112)$$

onde:  $t_n$  é o tempo em que o n-ésimo pico ocorre.

2. Decremento logarítmico ( $\delta$ ): É dado por

$$\delta = \log\left(\frac{x(t_n)}{x(t_n + 1)}\right) \quad (3.113)$$

onde:  $x(t_n)$  é a amplitude do deslocamento em que o n-ésimo pico ocorre. Ou usando a expressão:

$$\delta = \frac{1}{n} \log\left(\frac{x(t_0)}{x(t_n)}\right) \quad (3.114)$$

Assim pode-se encontrar os valores de ( $\omega_n$ ) e ( $\varsigma$ ) a partir de  $T$  e  $\delta$  utilizando as equações (3.115) e (3.116):

$$\varsigma = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (3.115)$$

$$\omega_n = \frac{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}}{T} \quad (3.116)$$

Desta forma, pode-se avaliar os parâmetros frequência natural ( $\omega_n$ ) e coeficiente de amortecimento ( $\varsigma$ ) de uma estrutura através de uma análise gráfica.

### 3.9 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos relacionados com a propagação das ondas ultra-sônicas, com uso da transformada Wavelet e com os testes utilizando métodos de vibração, com o intuito de apresentar a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento e escolha das técnicas de detecção de incrustação com os métodos não-invasivos.

Nos Capítulos 4, 5 e 6 são apresentadas as técnicas desenvolvidas para detecção da incrustação em locais específicos, utilizando métodos não-invasivos, de modo a detectar a incrustação e verificar sua tendência de aumento, para auxiliar o processo de manutenção das tubulações.

# Capítulo 4

## Detecção de incrustação utilizando ondas guiadas e estimação de parâmetros

### 4.1 Introdução

Na primeira técnica proposta, o problema da propagação de onda é simplificado utilizando o modelo de Pulsos Gaussianos para o sinal ultra-sônico, sendo os parâmetros deste modelo estimados para análise e detecção da incrustação. Neste caso, os sinais monitorados precisam ser processados e programas foram desenvolvidos para estimação dos parâmetros.

### 4.2 Circuitos desenvolvidos

Para a aplicação de ondas guiadas na tubulação sob testes, pode-se utilizar uma estrutura como a descrita na Figura 3.1, com um transdutor ultra-sônico transmissor e um receptor [5].

Para geração do sinal de ultra-som, ilustra-se na Figura 4.1 o diagrama de blocos do circuito pulsador. O diagrama é composto basicamente por uma fonte CC e um gerador de ondas quadradas, que é usado para acionar uma chave analógica, de modo a obter os pulsos com a amplitude e frequência desejada, para excitar o transdutor ultra-sônico. Também é utilizado um acionador de corrente para fornecer a corrente requerida pela chave analógica.

O diagrama esquemático do circuito projetado para o pulsador é apresentado na Figura 4.2. Neste circuito são implementados as fontes de tensão e um multivibrador astável com o

CI LM7555 para gerar os pulsos que acionam o transistor MOS (IRF830) de forma a produzir os pulsos de curta duração desejados.

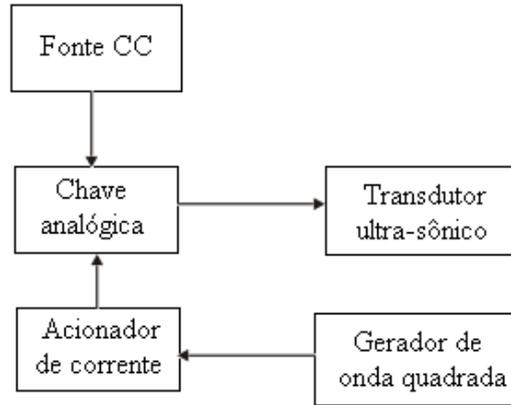


Figura 4.1: Diagrama de blocos do circuito pulsador.

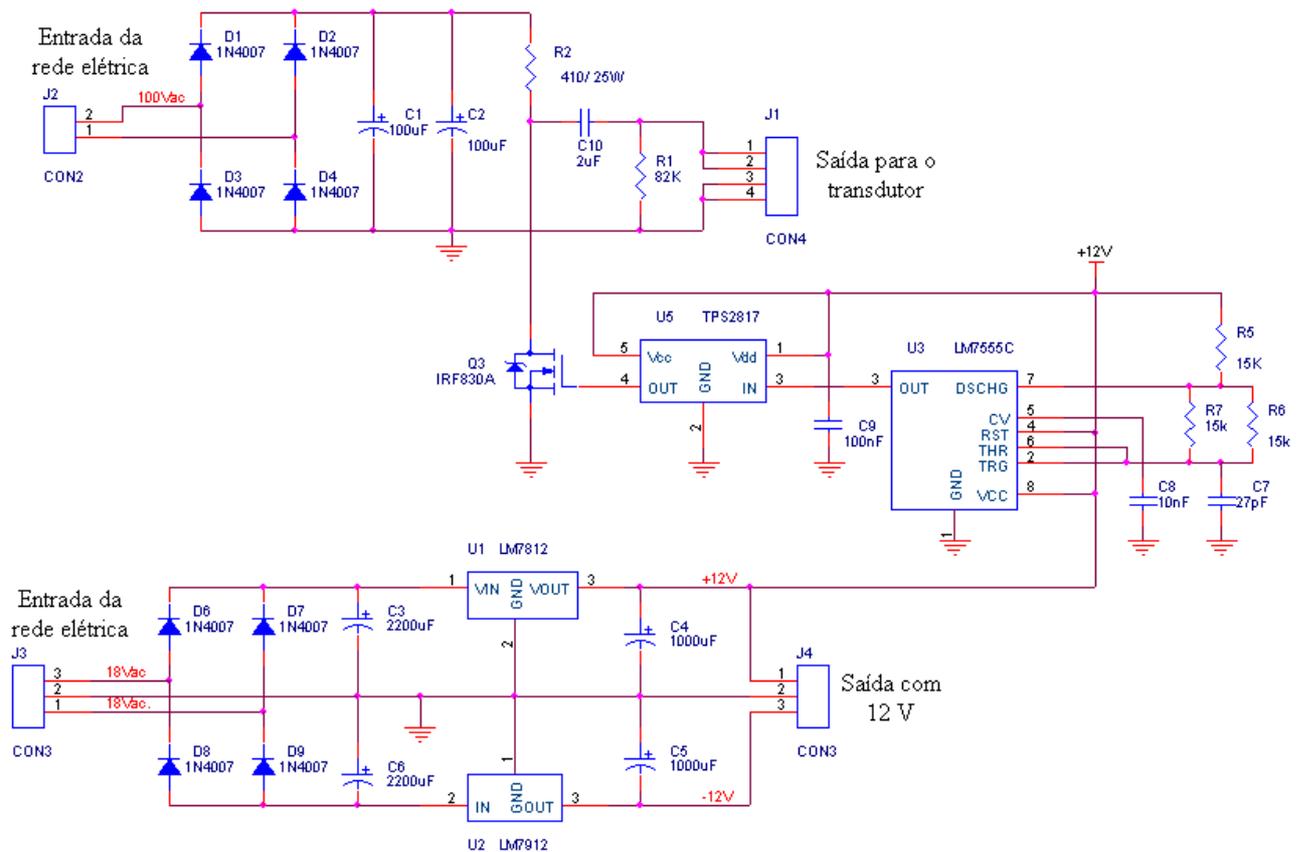


Figura 4.2: Diagrama esquemático do circuito para o pulsador ultra-sônico.

O sinal de saída do circuito pulsador está apresentado na Figura 4.3. Este sinal possui amplitude máxima de 80 V e frequência de 500 kHz. Estes valores são necessários para geração das ondas guiadas e excitação do receptor.

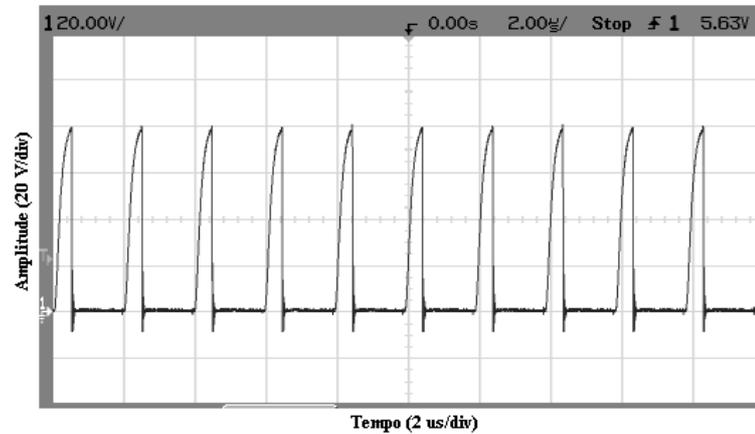


Figura 4.3: Forma de onda do sinal de saída do circuito pulsador.

O sinal de excitação do pulsador é um trem de pulsos com amplitude de 80 V e frequência de 500 kHz. Esta amplitude garante um nível mínimo de sinal recebido (na faixa de mV), e para amplitudes menores o sinal recebido é muito baixo e não excita o transdutor receptor. Esta frequência é necessária para garantir a geração das ondas guiadas, uma vez que a velocidade de propagação no ferro galvanizado é conhecida (4600 m/s) e o comprimento de onda deve ser maior ou igual à espessura da parede da tubulação (2,0 mm) [5]. O ângulo crítico determinado é de 35°, com isso um transdutor com ângulo de 30° é utilizado para gerar as ondas guiadas. Os transdutores angulares comerciais possuem ângulos de 30°, 40° e 45° [55].

As ondas guiadas podem se propagar por até 200 m, mas há uma redução na amplitude do sinal devido à atenuação do meio e a distância [1]. Mas para a tubulação estudada, foram realizados testes com uma variação de distância entre os transdutores de 5 a 70 cm (tamanho da parte removível da tubulação) e nenhuma redução de amplitude foi observada devido ao tamanho destas tubulações, uma vez que pretende-se analisar locais específicos e não grandes comprimentos de tubulações, devido a incrustação ter uma maior incidência em curvas e emendas.

Na Figura 4.4 ilustra-se um diagrama de blocos simplificado do receptor. Neste diagrama encontra-se inicialmente um estágio de amplificação, utilizado para aumentar a amplitude do sinal recebido, e em seguida um estágio de filtragem utilizado para selecionar os sinais que são monitorados.

O diagrama esquemático do circuito projetado para o receptor é apresentado na Figura 4.5. Nesta figura estão apresentados os componentes utilizados na montagem do receptor ultra-sônico.

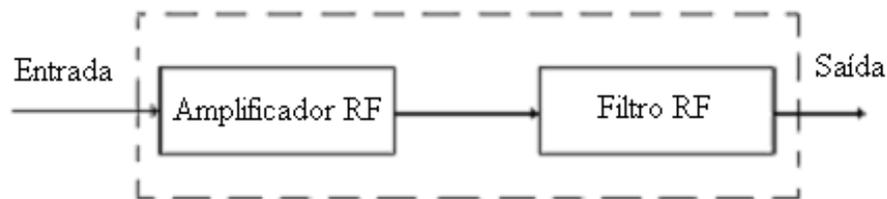


Figura 4.4: Diagrama de blocos simplificado do receptor ultra-sônico.

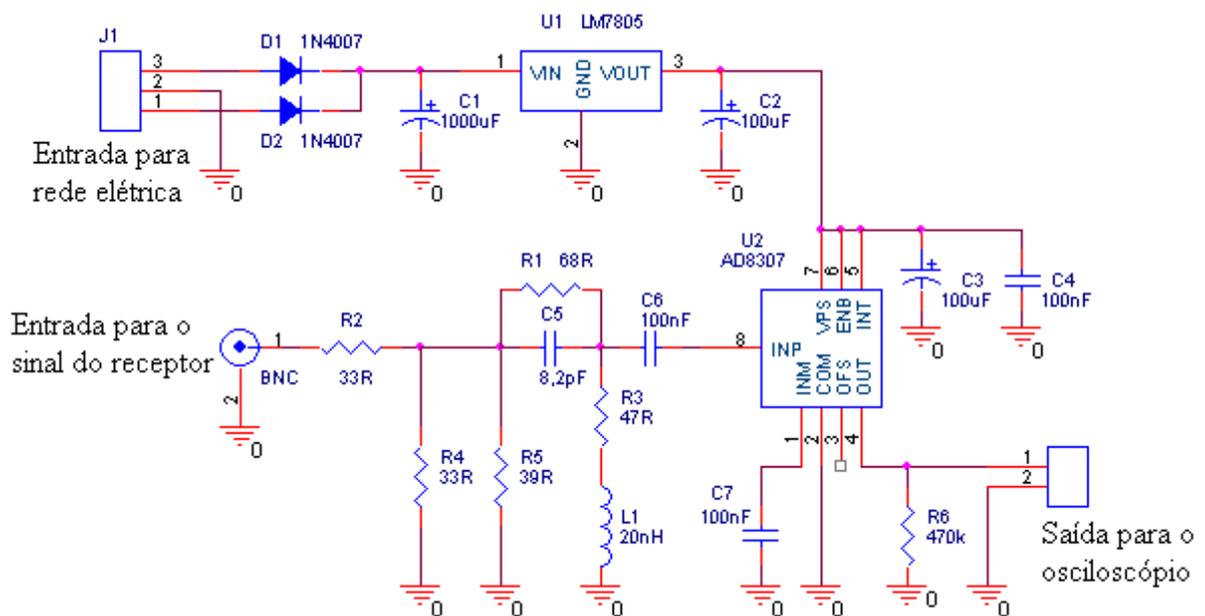


Figura 4.5: Diagrama esquemático do circuito receptor.

O sinal de saída do circuito receptor está apresentado na Figura 4.6. Este sinal possui amplitude máxima de 200 mV e frequência na faixa de MHz, apresentando características típicas de sinais ultra-sônicos.

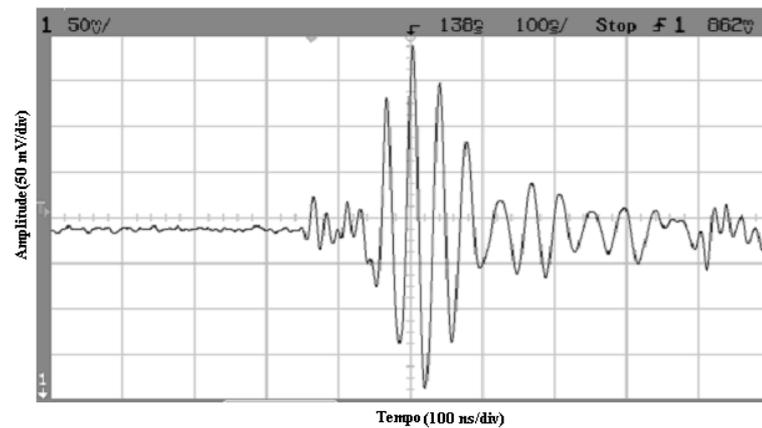


Figura 4.6: Forma de onda do sinal de saída do circuito receptor.

O circuito do receptor foi projetado baseado no circuito integrado AD8307. Na saída do circuito tem-se um valor de tensão que é o equivalente logarítmico da amplitude do sinal de entrada. A rede C5-R3-L1 serve para compensar as indutâncias e capacitâncias parasitas.

Inicialmente os sinais são monitorados utilizando um osciloscópio digital e para detectar a incrustação, observa-se a redução no valor da amplitude dos sinais. Mas para uma análise mais precisa, é necessário observar outras características do sinal recebido, como variações de frequência e fase.

### 4.3 Plataforma de testes

Na Figura 4.7 ilustra-se um diagrama da montagem utilizada para aquisição de dados. Este diagrama é parte de uma plataforma desenvolvida para detecção da incrustação, onde se tem monitoração e controle da temperatura, pressão e vazão do processo [55]. Os circuitos do pulsador e receptor [5] são utilizados com os transdutores ultra-sônicos para gerar ondas guiadas ao longo da parede da tubulação, com o objetivo de detectar a incrustação. A tubulação possui uma espessura ( $d$ ) de 2,0 *mm* e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) do sinal é de 9,2 *mm*, uma vez que para gerar ondas guiadas é necessário que a espessura da tubulação seja menor ou igual ao comprimento de onda.

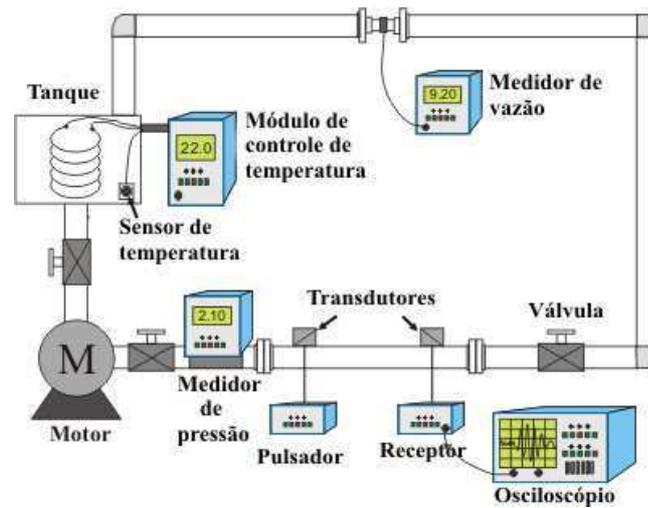


Figura 4.7: Diagrama da montagem utilizada.

Na Figura 4.8 é apresentada uma fotografia da plataforma de testes utilizada, com os transdutores, circuitos pulsador e receptor, além dos sensores de pressão e vazão utilizados para monitoramento do fluxo nas tubulações. Na Figura 4.9 apresenta-se uma fotografia mais detalhada da plataforma, destacando os seus componentes.

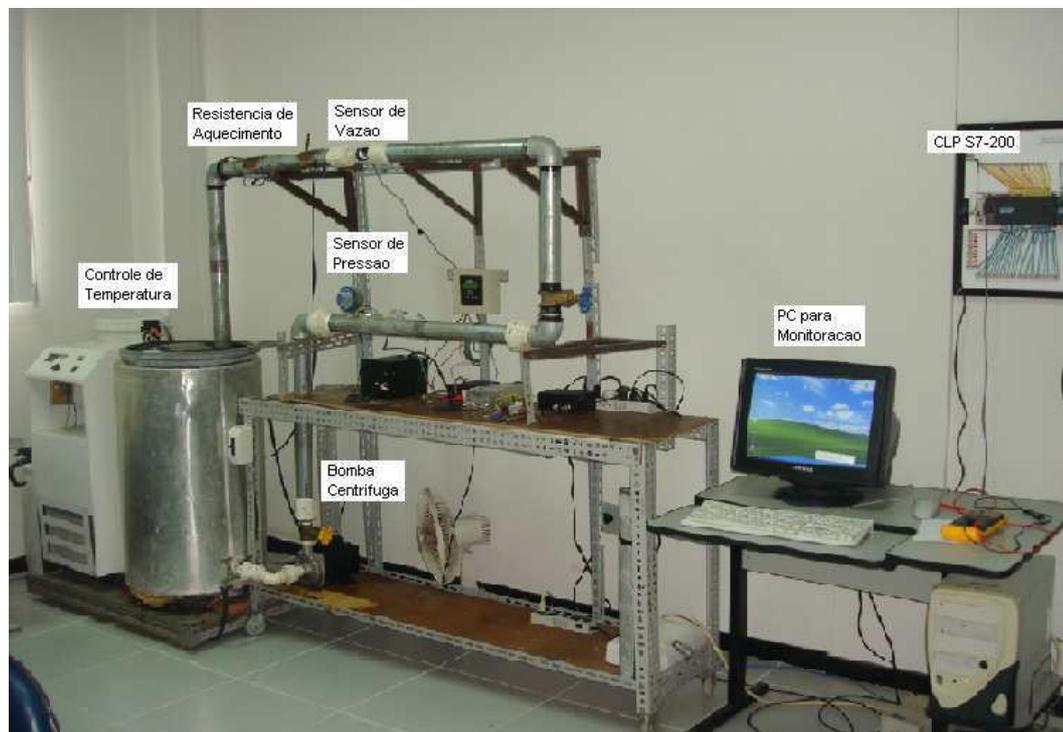


Figura 4.8: Fotografia da plataforma utilizada.

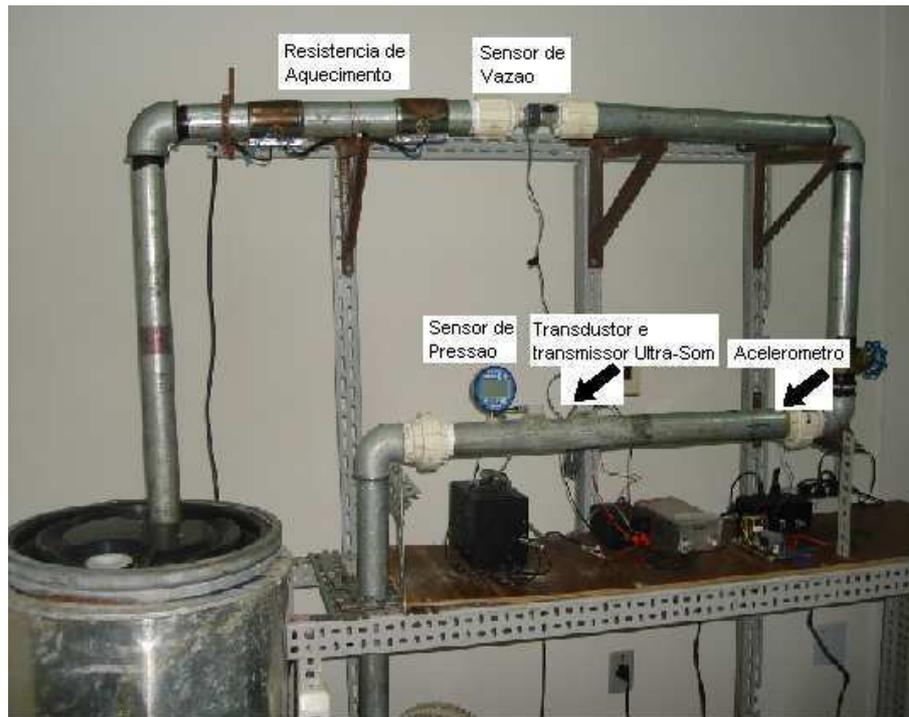


Figura 4.9: Fotografia detalhada da plataforma utilizada.

Os transdutores foram colocados em posições diferentes na tubulação, mas os resultados das medições são os mesmos, pois a água que circula preenche totalmente a tubulação, e retirando a parte removível é possível observar a incrustação ao redor da parede interna da tubulação, sem concentrações na parte de baixo ou na parte de cima.

Para garantir as mesmas condições de testes e mostrar que alterações nos sinais recebidos são apenas devido a incrustação, a temperatura é mantida em  $22^{\circ}C$ , o valor da pressão é de  $2,1 \text{ Kgf/cm}^2$  e a vazão é de  $9,2 \text{ LPM}$  (litros por minuto). Se a temperatura diminuir, aumenta o processo de incrustação, pois as substâncias presentes no líquido irão cristalizar de forma mais rápida e se a temperatura aumentar o processo de incrustação irá reduzir, pois aumenta a agitação térmica das moléculas. O aumento da pressão faz com que o processo de incrustação demore mais a se formar, devido à força do fluido transportado. E se a vazão for reduzida poderá também afetar o processo de incrustação, favorecendo a agregação das substâncias na parede da tubulação. Desta forma, modificações de temperatura, pressão e vazão influenciam no processo de incrustação [55].

Para acelerar o processo de incrustação nas tubulações sob testes, são utilizadas as substâncias apresentadas a seguir:

- Hidróxido de Cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) = 130 *mg/l* para 100 litros: 24,05 *g*
- Sulfato de Magnésio ( $MgSO_4$ ) = 20 *mg/l* para 100 litros: 9,9 *g*
- Cloreto de Sódio ( $NaCl$ ) para 15000 *ppm* utilizar 2,472 *kg*
- Sulfato de Bário ( $BaSO_4$ ) = 100 *mg/l* para 100 litros: 16,99 *g*

As quantidades especificadas são para um reservatório com 100 litros de solução. Desta forma utiliza-se um reservatório com 100 litros de água destilada junto com os compostos citados. Para aumentar a incrustação basta aumentar as quantidades das substâncias. As características das substâncias são do efluente (água de produção) da unidade de tratamento e bombeamento da PETROBRÁS localizada em Guamaré-RN, com o intuito de que os testes realizados se aproximem o máximo das condições reais do processo de incrustação que ocorre nas tubulações [55].

#### 4.4 Técnica Proposta usando estimação de parâmetros

O modelo de pulsos Gaussianos foi o escolhido para realização da estimação dos parâmetros, uma vez que este modelo é mais detalhado e apresenta os parâmetros que definem os pulsos ultra-sônicos de forma mais completa. Este modelo foi utilizado anteriormente com o método ultra-sônico de Pulso-eco para detectar falhas e rachaduras em estruturas metálicas. Na primeira técnica proposta, o modelo de pulsos Gaussianos foi utilizado com o método das ondas guiadas ultra-sônicas, de modo que os parâmetros deste modelo foram estimados. A análise da incrustação é feita observando-se, a variação dos parâmetros estimados no modelo de pulsos Gaussianos.

O problema da estimação baseia-se na determinação dos parâmetros do modelo e na observação de modificações destes parâmetros quando a incrustação está presente na tubulação. Os métodos de estimação não-lineares são utilizados, com programas desenvolvidos com o *software* MATLAB® [82], para determinar os parâmetros do modelo.

Para formulação do problema de estimação de parâmetros, as seguintes etapas foram seguidas:

- Coleta de dados do sistema a ser modelado, utilizando uma plataforma de testes desenvolvida;

- Escolha da representação matemática a ser utilizada, neste caso o uso do modelo de pulsos Gaussianos, por se tratar de um modelo mais completo que os outros estudados;
- Estimação dos parâmetros do modelo, utilizando o método de mínimos quadrados não linear.

Considerando a versão discreta para M pulsos Gaussianos superpostos, como apresentado no Capítulo 3, temos:

$$\hat{y}_p(\theta_m, t) = \sum_{m=1}^M S_G(\theta_m) + e_w \quad (4.1)$$

onde  $\hat{y}_p(\theta_m, t)$  denota um conjunto de pulsos superpostos;  $S_G(\theta_m)$  denota o modelo do pulso Gaussiano;  $\theta_m$  é o vetor paramétrico; e  $e_w$  denota um processo WGN.

A equação (4.1) não pode ser minimizada por métodos analíticos, uma vez que o modelo de pulsos Gaussianos é não linear.

$$S_G(\theta, t) = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t - \tau) + \varphi) \quad (4.2)$$

A solução deve ser encontrada de forma iterativa, com técnicas numéricas. Então o problema da estimação de parâmetros está em estimar os vetores paramétricos  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ , dados os pulsos observados.

Dado um conjunto de medições  $y_p(t)$  de pulsos ultra-sônicos, a função custo pode ser determinada por:

$$V(\theta_m) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y_p(t) - \hat{y}_p(\theta_m, t)]^2 \quad (4.3)$$

Desta forma:

$$\hat{\theta}_m = \arg \min V(\theta_m) \quad (4.4)$$

Neste caso foi utilizado o método de mínimos quadrados não linear para estimação dos parâmetros do modelo de pulsos Gaussianos.

## 4.5 Resultados obtidos com simulações

Inicialmente foram realizadas simulações utilizando o modelo Gaussiano para pulsos ultrassônicos. Um processo com um pulso simples foi simulado e os parâmetros foram estimados. Para realização das simulações utiliza-se o modelo de pulsos Gaussianos considerando determinados valores para os parâmetros (valores reais) e utilizando o método dos mínimos quadrados não-linear, estima-se os valores dos parâmetros do modelo.

Na Tabela 4.1 estão apresentados os valores reais e estimados, obtidos com a simulação para um pulso simples. Para realizar a simulação é necessária uma escolha inicial dos parâmetros, com isso uma boa escolha inicial não garante apenas uma solução ótima, mas também diminui o tempo de processamento e o número de iterações.

Um sinal com pulsos múltiplos também foi simulado. Na Tabela 4.2 estão apresentados os valores obtidos com a simulação para pulsos múltiplos.

Na Figura 4.10 estão apresentadas as curvas resultantes da simulação para a estimação de parâmetros de um pulso simples (único pulso). Observa-se que a curva com os parâmetros estimados é semelhante a curva com os parâmetros reais, comprovando assim a eficácia do programa e do método utilizado. Para esta simulação o tempo de processamento foi de 4,42 s, o erro médio de estimação para os parâmetros foi igual a 12,5 % (erro percentual) e o número de iterações foi igual a 20.

Na Figura 4.11 estão apresentadas as curvas resultantes da simulação para a estimação de parâmetros do sinal com pulsos múltiplos (conjunto de pulsos). Para esta simulação o tempo de processamento foi de 215,37 s, o erro médio de estimação para os parâmetros foi igual a 11,2% e o número de iterações foi igual a 40.

Tabela 4.1: Resultados da simulação com pulsos simples.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores reais</b>	<b>Valores estimados</b>
$\alpha$ (MHz)	40	36
$\tau$ ( $\mu$ s)	0,50	0,45
$f_c$ (MHz)	20	18
$\beta$ (V)	0,8	0,7
$\varphi$ (rad)	1,0	0,9

Tabela 4.2: Resultados da simulação com pulsos múltiplos.

Parâmetros	Valores reais	Valores estimados
$\alpha_0$ (MHz)	40	36
$\tau_0$ ( $\mu s$ )	0,50	0,45
$f_{c0}$ (MHz)	20	18
$\beta_0$ (V)	0,8	0,7
$\varphi_0$ (rad)	1,0	0,9
$\alpha_1$ (MHz)	40	36
$\tau_1$ ( $\mu s$ )	1,50	1,35
$f_{c1}$ (MHz)	15,0	13,5
$\beta_1$ (V)	0,60	0,54
$\varphi_1$ (rad)	0,87	0,79

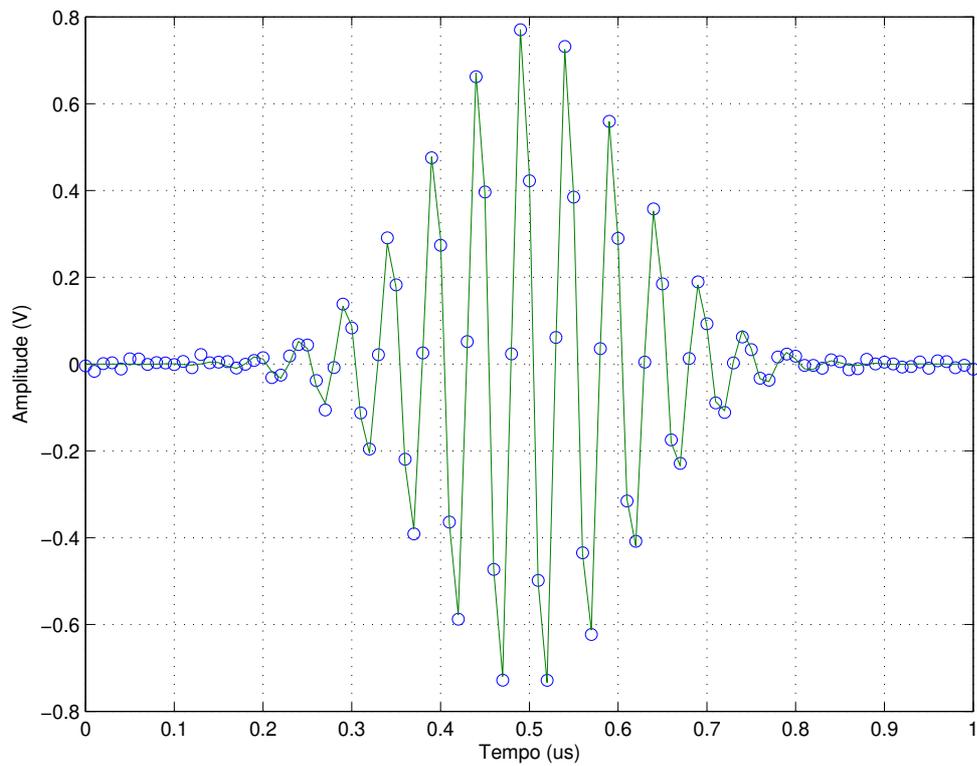


Figura 4.10: Resultados da simulação para um pulso simples: Os pontos representam o sinal real e a linha cheia representa o sinal estimado.

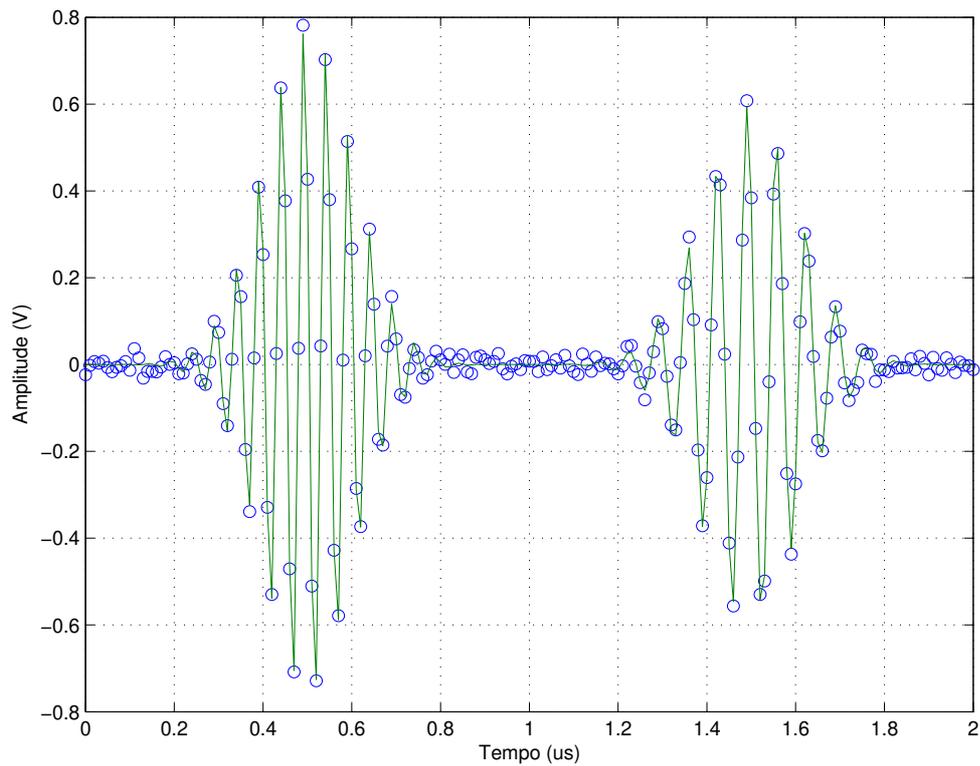


Figura 4.11: Resultados da simulação para um sinal com pulsos múltiplos: Os pontos representam o sinal real e a linha cheia representa o sinal estimado.

Com as simulações é possível observar o comportamento dos pulsos Gaussianos e analisar os parâmetros estimados para estes pulsos, como também testar os programas desenvolvidos e avaliar como estes programas são utilizados para determinar os parâmetros para o modelo. Uma observação importante em relação a estimação é a escolha dos parâmetros iniciais, que são obtidos através da observação dos sinais medidos, e que dependendo da escolha, aumenta o tempo de processamento e também o erro de estimação. Com isso, através da aplicação do modelo e dos métodos de estimação dos parâmetros pretende-se observar as variações destes parâmetros com o processo de incrustação.

## 4.6 Resultados experimentais da estimação de parâmetros

Uma fase preliminar de calibração para definição da assinatura da tubulação inicialmente é realizada, nesta fase a tubulação é toda limpa de forma que não exista nenhuma incrustação na mesma. Assim os transdutores podem ser excitados e os sinais recebidos podem ser monitorados,

e as características destes sinais (amplitude, frequência, etc) são tomados como referência para determinação da incrustação.

O procedimento de utilização desta técnica é o seguinte: inicialmente excita-se o transdutor transmissor (ultra-sônico), de forma a gerar as ondas guiadas ultra-sônicas pela tubulação; adquire-se o sinal detectado pelo transdutor receptor (ultra-sônico); e com os dados adquiridos, determina-se os parâmetros do modelo de pulsos Gaussianos, e verifica-se as variações destes parâmetros com a presença da incrustação.

Utilizando a plataforma de testes apresentada anteriormente, foi possível adquirir os dados na saída do receptor. Os dados obtidos para o sinal de saída do receptor são ilustrados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 respectivamente. O sinal apresentado na Figura 4.12 é para a tubulação limpa, ou seja sem incrustação. O sinal apresentado na Figura 4.13 é para tubulação com espessura de aproximadamente 1 *mm* de incrustação. O sinal apresentado na Figura 4.14 é para tubulação com espessura de aproximadamente 3 *mm* de incrustação, e pode ser observado uma redução na amplitude do sinal monitorado. A redução na amplitude do sinal monitorado ocorreu devido à presença da incrustação, uma vez que quando a onda guiada encontra uma superfície diferente, parte do sinal é transmitida pela nova interface. Para observar a incrustação, as tubulações são retiradas da plataforma de testes e com isso pode-se fazer uma inspeção visual dentro da tubulação. A frequência de amostragem é de 200 MHz e são capturados 2000 pontos no intervalo de tempo de 1 *us* com o osciloscópio digital.

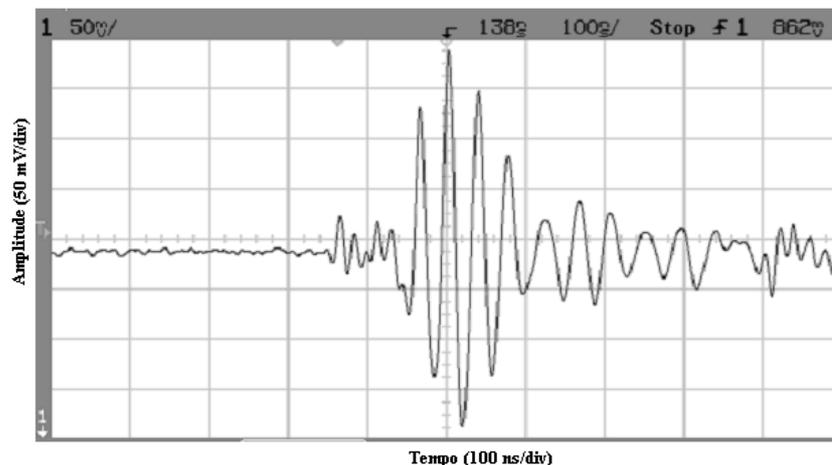


Figura 4.12: Forma de onda do sinal de saída do receptor para tubulação sem incrustação.

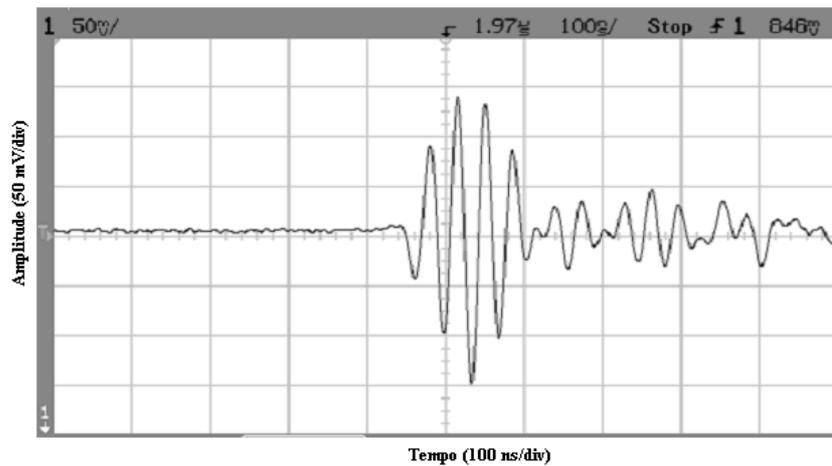


Figura 4.13: Forma de onda do sinal de saída do receptor para tubulação com 1 *mm* de incrustação.

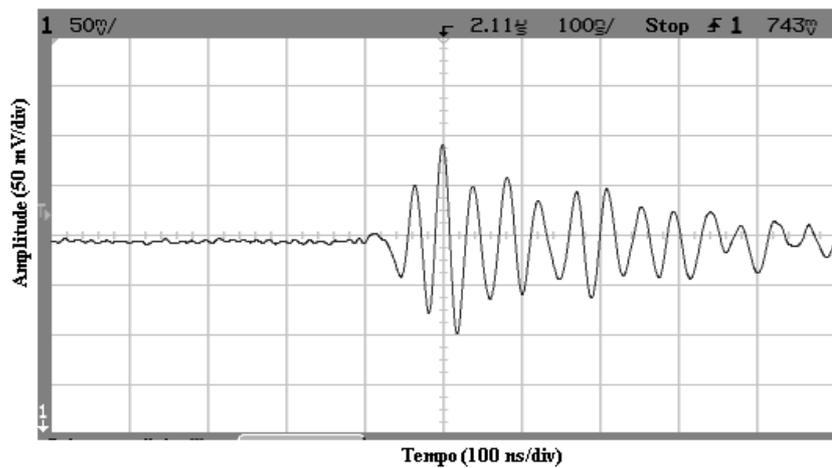


Figura 4.14: Forma de onda de saída do receptor para tubulação com 3 *mm* de incrustação.

Utilizando o modelo para pulsos Gaussianos, foi possível estimar os parâmetros para os sinais medidos na saída do receptor, que estão representados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14. Os resultados com a estimação dos parâmetros para estes sinais estão ilustrados nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 respectivamente. Os parâmetros estimados para estes sinais estão apresentados na Tabela 4.3. Para o sinal da Figura 4.12 o tempo de processamento foi de 148,39 s, o erro médio de estimação para os parâmetros foi igual a 12,312% e o número de iterações foi igual a 10. Para o sinal da Figura 4.13 o tempo de processamento foi de 62,099 s, o erro médio de estimação para os parâmetros foi igual a 12,606% e o número de iterações foi igual a 6. E para o sinal da Figura 4.14 o tempo de processamento foi de 39,29 s, o erro médio de estimação para os

parâmetros foi igual a 12,913% e o número de iterações foi igual a 4.

Tabela 4.3: Parâmetros estimados para os sinais medidos.

	Sem incrustação	Com 1 mm de incrustação	Com 3 mm de incrustação
$\alpha$ (MHz)	90	85	80
$\tau$ ( $\mu$ s)	1,36	1,71	2,11
$f_c$ (MHz)	30	27	24
$\beta$ (V)	0,18	0,14	0,09
$\varphi$ (rad)	0,87	0,89	0,92

Os modelos utilizados apresentam uma boa aproximação dos sinais reais medidos, e as variações nos parâmetros devido a influência da incrustação podem ser observadas. Desta forma, tomando como referência os parâmetros estimados para o sinal com a tubulação limpa, uma variação nestes parâmetros para outros sinais representa uma forte indicação da incrustação presente nas tubulações sob estudo [83-84]. Com isso os valores absolutos dos sinais são comparados e as modificações, como aumento ou redução, nos valores dos parâmetros são observadas para detecção da incrustação [85]. Para observar a incrustação, as tubulações analisadas são retiradas da plataforma de testes e com isso pode-se fazer uma inspeção visual dentro da tubulação [55].

Assim, com o uso do modelo de pulsos Gaussianos e os parâmetros estimados para este modelo, a detecção da incrustação baseia-se na análise da variação dos parâmetros tomando como referência a estimativa inicial com a tubulação limpa.

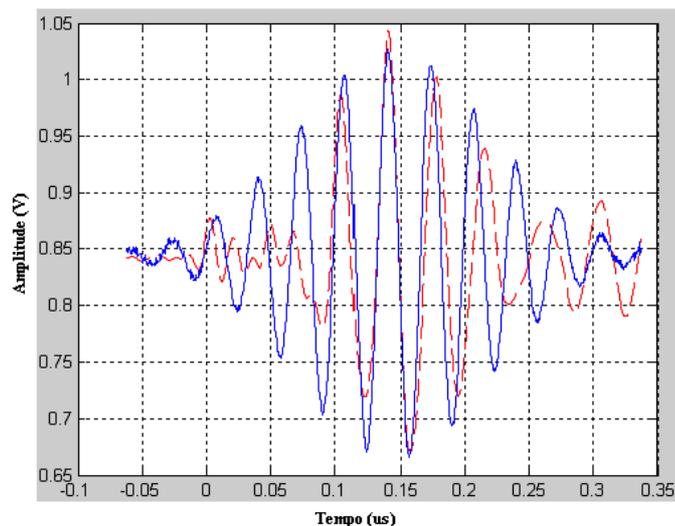


Figura 4.15: Representação do sinal medido na saída do receptor (sinal tracejado) e do sinal estimado como pulsos Gaussianos (sinal contínuo) para tubulação sem incrustação.

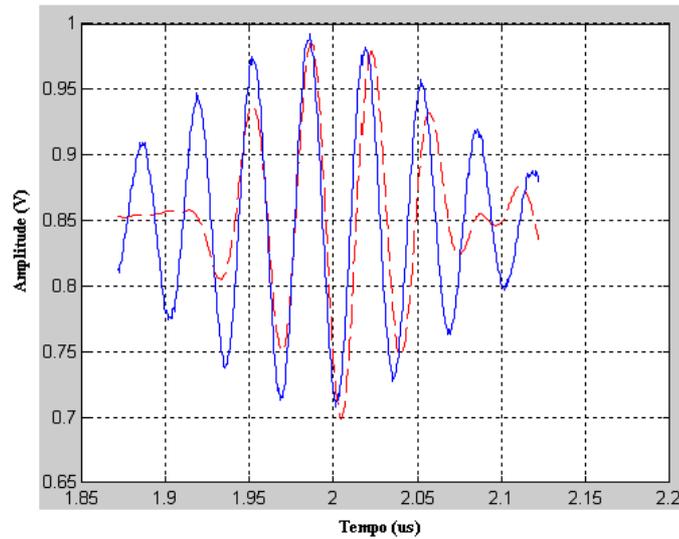


Figura 4.16: Representação do sinal medido na saída do receptor (sinal tracejado) e do sinal estimado como pulsos Gaussianos (sinal contínuo) para tubulação com 1 *mm* de incrustação.

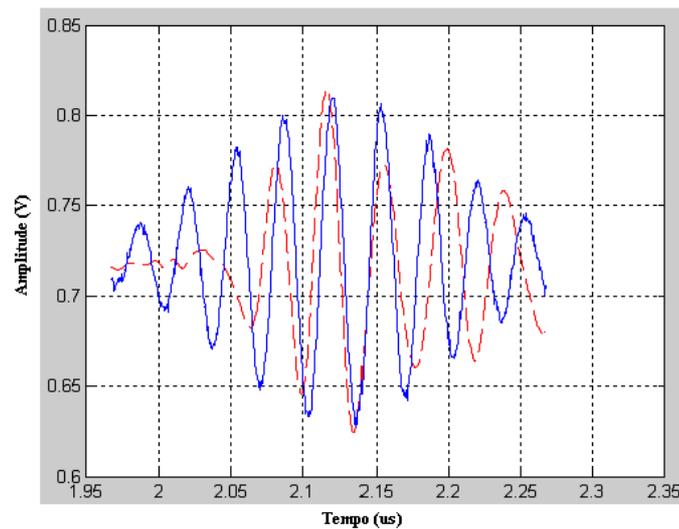


Figura 4.17: Representação do sinal medido na saída do receptor (sinal tracejado) e do sinal estimado como pulsos Gaussianos (sinal contínuo) para tubulação com 3 *mm* de incrustação.

Com os resultados experimentais, os pulsos ultra-sônicos foram modelados em função de pulsos Gaussianos e seus parâmetros foram estimados usando os programas desenvolvidos. Observando as variações nestes parâmetros, a incrustação pode ser detectada, uma vez que os parâmetros para a tubulação limpa são tomados como referência e as modificações nos mesmos são atribuídas a incrustação, que pode ser observada dentro das tubulações da plataforma de testes.

Na técnica proposta neste capítulo são observadas modificações nos seguintes parâmetros:

- $\alpha$ : parâmetro associado ao tempo de duração do pulso (sinal ultra-sônico);
- $\tau$ : parâmetro associado ao tempo de reflexão do pulso;
- $f_c$ : parâmetro associado a frequência central do pulso;
- $\beta$ : parâmetro associado à amplitude do pulso;
- $\varphi$ : parâmetro associado à fase do pulso;

Se não ocorrem modificações nos valores dos parâmetros, significa que não há incrustação nas tubulações monitoradas. Nas condições de testes utilizadas no laboratório, o aumento da incrustação provoca alterações nos valores destes parâmetros, facilitando assim a detecção da incrustação.

## 4.7 Uso da FFT para determinação das frequências

Quando o número de pulsos do sinal aumenta, aumentam também a quantidade de parâmetros a serem estimados e o tempo de estimação, bem como o número de iterações. Para reduzir o número de parâmetros a serem estimados foi calculada a FFT do sinal, de forma a determinar quais as frequências que estão presentes no sinal com pulsos múltiplos.

As curvas resultantes da simulação de um sinal com pulsos múltiplos e a FFT deste sinal estão apresentados nas Figuras 4.18 e 4.19 respectivamente. Considerou-se como parâmetros para o sinal real:  $\alpha_0 = 40$ ,  $\tau_0 = 0,5$ ,  $f_{c0} = 20$ ,  $\beta_0 = 0,8$ ,  $\varphi_0 = 1$ ,  $\alpha_1 = 30$ ,  $\tau_1 = 1,0$ ,  $f_{c1} = 15$ ,  $\beta_1 = 0,5$ ,  $\varphi_1 = 0,85$ ,  $\alpha_2 = 15$ ,  $\tau_2 = 1,5$ ,  $f_{c2} = 10$ ,  $\beta_2 = 0,9$  e  $\varphi_2 = 0,95$ . Como pode ser observado, com o uso da FFT as frequências presentes nos sinais podem ser determinadas, reduzindo assim o número de parâmetros a serem estimados. Assim na Figura 4.19 apresenta-se o gráfico da FFT, destacando-se as três frequências (10, 15 e 20 MHz) presentes no sinal da Figura 4.18.

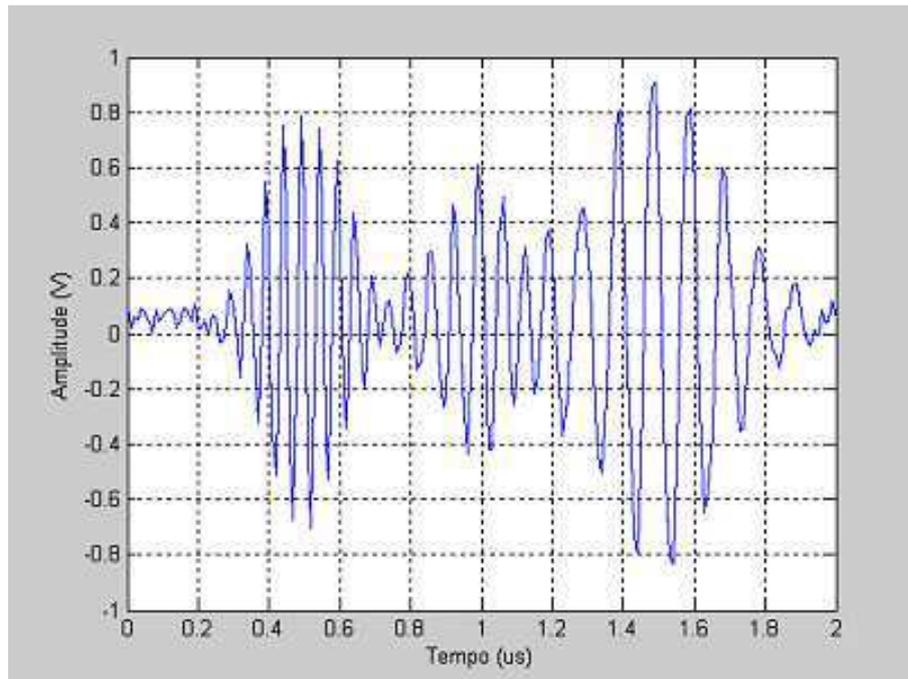


Figura 4.18: Representação de um sinal com pulsos múltiplos.

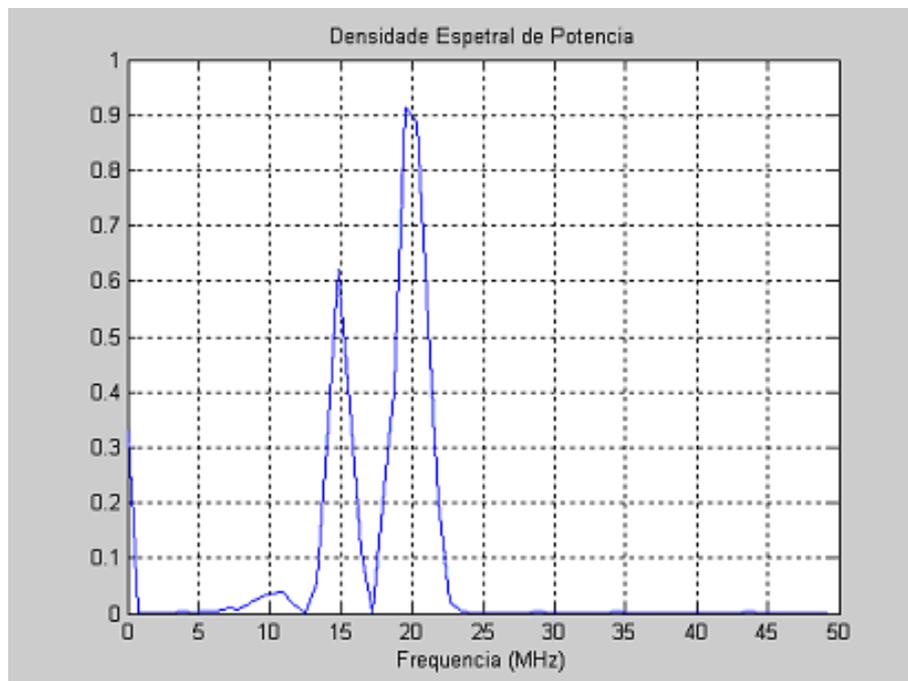


Figura 4.19: Representação da FFT para o sinal da Figura 4.18.

Em seguida foi utilizada a FFT para determinar as frequências presentes nos sinais medidos representados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 respectivamente. Estes sinais medidos estão representados nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 respectivamente. Os sinais obtidos com o cálculo da FFT para os sinais medidos anteriormente estão representados nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 respectivamente. Para o primeiro sinal a frequência determinada foi de 30 MHz, para o segundo sinal (com 1 mm de incrustação) a frequência determinada foi de 27 MHz e para o terceiro sinal (com 3 mm de incrustação) a frequência determinada foi de 24 MHz. Com isso observa-se que as frequências determinadas para os três sinais, com o uso da FFT, apresentam os mesmos valores estimados anteriormente e que o aumento da incrustação também provoca uma redução na frequência do sinal monitorado.

A seguir são apresentados os resultados para representação dos sinais medidos (Figuras 4.20, 4.21 e 4.22).

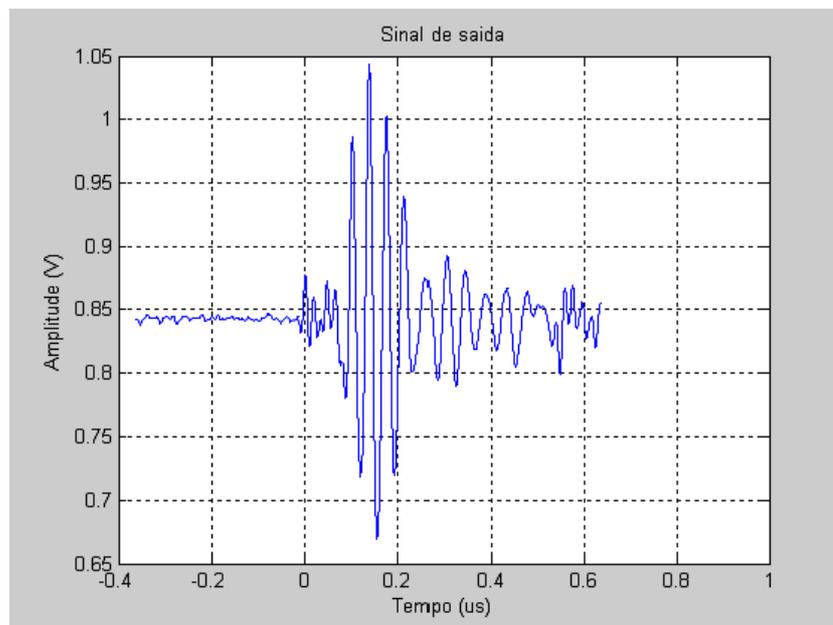


Figura 4.20: Representação do sinal medido na saída do receptor para tubulação sem incrustação.

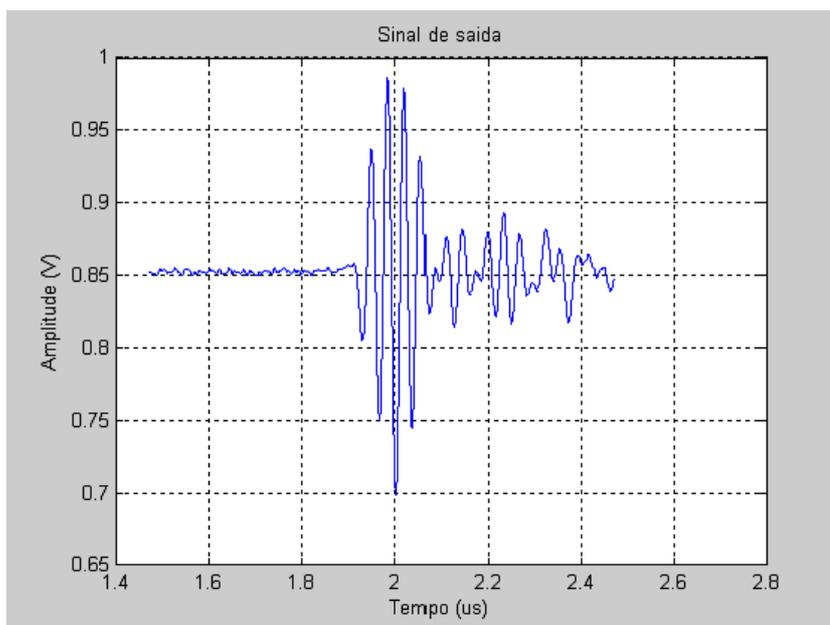


Figura 4.21: Representação do sinal medido na saída do receptor para tubulação com 1 *mm* de incrustação.

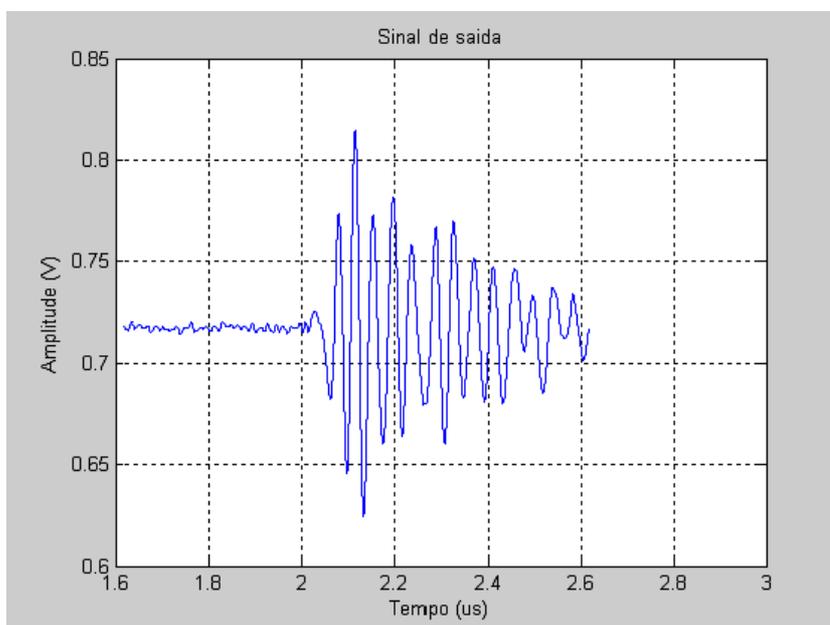


Figura 4.22: Representação do sinal medido na saída do receptor para tubulação com 3 *mm* de incrustação.

Analisando os resultados das Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 respectivamente, observa-se que a FFT pode ser utilizada para determinar quais são as frequências dos pulsos ultra-sônicos, que

nesta técnica, são utilizadas em conjunto com outros parâmetros para detecção da incrustação.

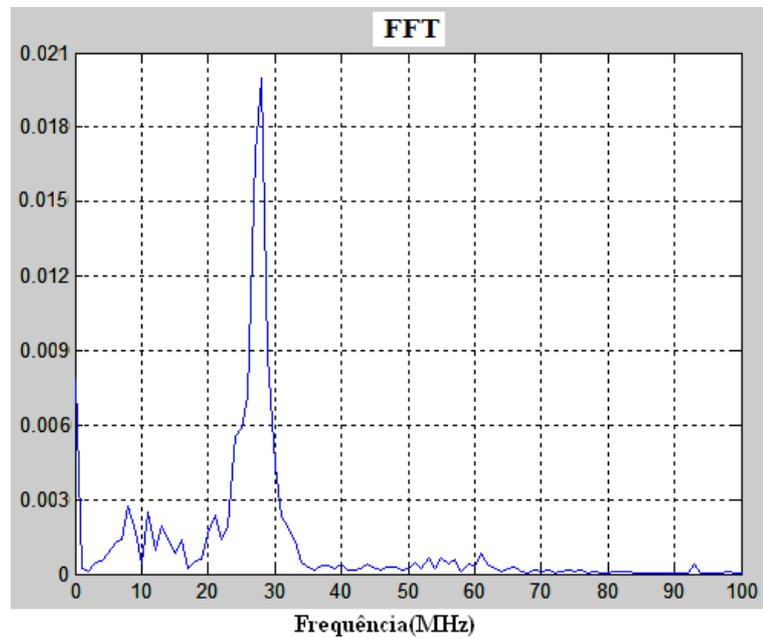


Figura 4.23: Representação da FFT para o sinal medido na saída do receptor para tubulação sem incrustação.

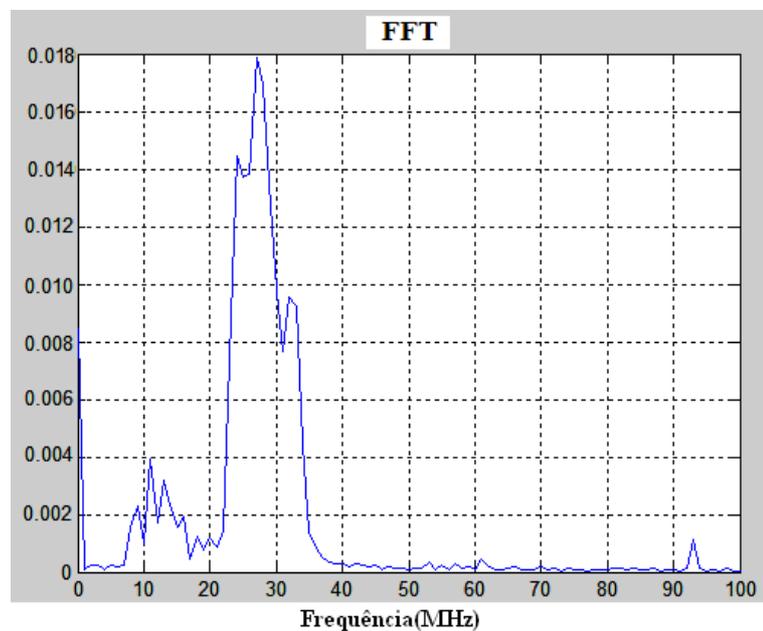


Figura 4.24: Representação da FFT para o sinal medido na saída do receptor para tubulação com 1 mm de incrustação.

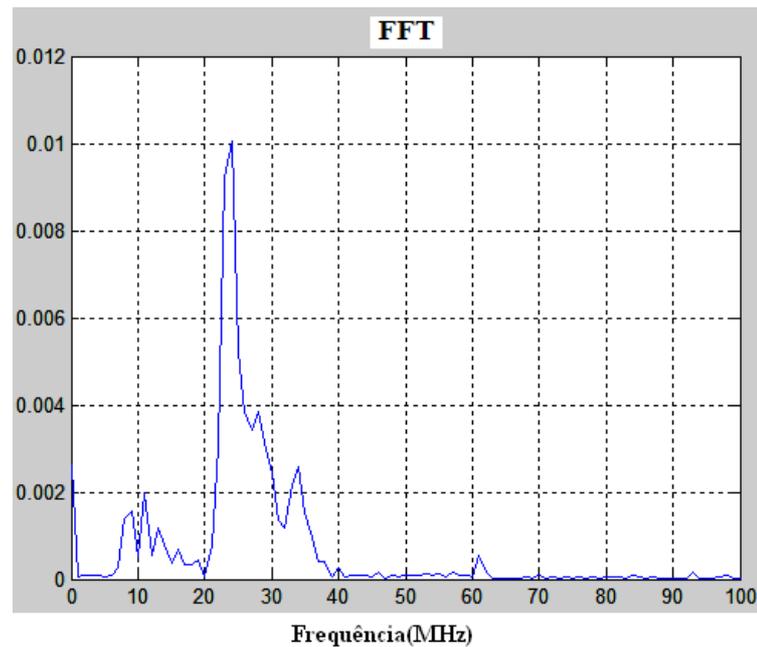


Figura 4.25: Representação da FFT para o sinal medido na saída do receptor para tubulação com 3 mm de incrustação.

## 4.8 Critério de sensibilidade para primeira técnica proposta

Dada uma função  $\zeta(t, p_m)$  com  $m$  parâmetros expressa por:

$$\zeta(t, p_m) = \zeta(t, p_1, p_2, \dots, p_m), \quad (4.5)$$

a função de sensibilidade em relação a um dado parâmetro  $p_k$  pode ser determinada por:

$$S_i = \frac{\partial \zeta(t, p_m)}{\partial p_k} \quad (4.6)$$

Uma avaliação da técnica utilizada pode ser realizada através de critérios de sensibilidade  $S_i(\cdot)$ .

Os critérios de sensibilidade para cada parâmetro estimado em relação ao aumento da espessura de incrustação (sensibilidade relativa) podem ser definidos como:

$$S_i(\alpha) = \frac{\Delta\alpha}{\Delta e} \quad (4.7)$$

onde:  $\Delta\alpha$  é a variação do parâmetro  $\alpha$  e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

$$S_i(\tau) = \frac{\Delta\tau}{\Delta e} \quad (4.8)$$

onde:  $\Delta\tau$  é a variação do parâmetro  $\tau$  e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

$$S_i(f_c) = \frac{\Delta f_c}{\Delta e} \quad (4.9)$$

onde:  $\Delta f_c$  é a variação do parâmetro  $f_c$  e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

$$S_i(\beta) = \frac{\Delta\beta}{\Delta e} \quad (4.10)$$

onde:  $\Delta\beta$  é a variação do parâmetro  $\beta$  e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

$$S_i(\varphi) = \frac{\Delta\varphi}{\Delta e} \quad (4.11)$$

onde:  $\Delta\varphi$  é a variação do parâmetro  $\varphi$  e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

Pode-se definir também a sensibilidade normalizada  $S_N$ , em relação aos parâmetros de referência, ou seja, dividindo a sensibilidade relativa pelos parâmetros obtidos com a tubulação sem incrustação.

Os critérios de sensibilidade normalizada para cada parâmetro estimado em relação ao aumento da espessura de incrustação podem ser definidos como:

$$S_N(\alpha) = \frac{\frac{\Delta\alpha}{\Delta e}}{\alpha_0} \quad (4.12)$$

onde:  $\alpha_0$  é o valor do parâmetro  $\alpha$  para tubulação sem incrustação.

$$S_N(\tau) = \frac{\frac{\Delta\tau}{\Delta e}}{\tau_0} \quad (4.13)$$

onde:  $\tau_0$  é o valor do parâmetro  $\tau$  para tubulação sem incrustação.

$$S_N(f_c) = \frac{\frac{\Delta f_c}{\Delta e}}{f_{c0}} \quad (4.14)$$

onde:  $f_{c0}$  é o valor do parâmetro  $f_c$  para tubulação sem incrustação.

$$S_N(\beta) = \frac{\Delta\beta}{\beta_0} \quad (4.15)$$

onde:  $\beta_0$  é o valor do parâmetro  $\beta$  para tubulação sem incrustação.

$$S_N(\varphi) = \frac{\Delta\varphi}{\varphi_0} \quad (4.16)$$

onde:  $\varphi_0$  é o valor do parâmetro  $\varphi$  para tubulação sem incrustação.

Os resultados obtidos com a variação de cada parâmetro estimado em função do aumento da incrustação estão apresentados nas Figuras 4.26 a 4.30.

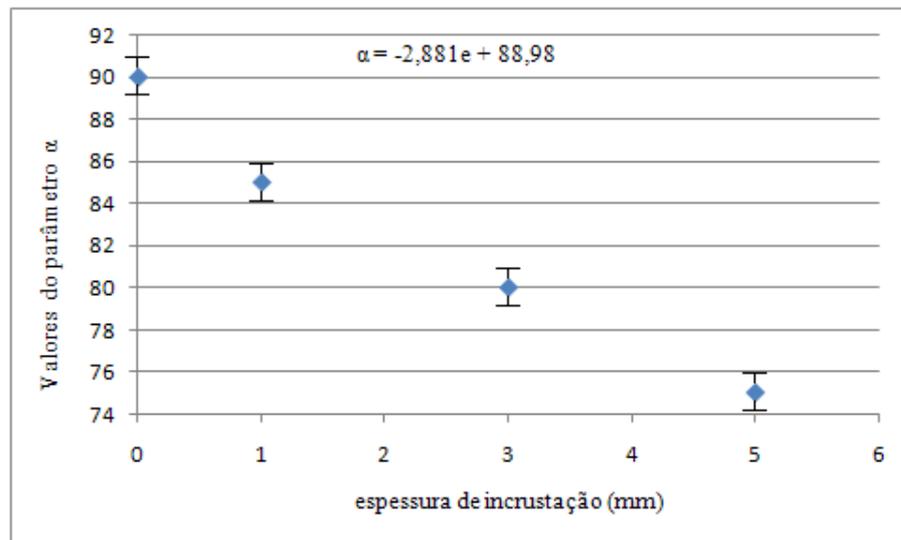


Figura 4.26: Gráfico da variação do parâmetro  $\alpha$  em função da incrustação.

O desvio em relação aos valores do parâmetro  $\alpha$  para cada ponto no gráfico é igual a 1,2%.

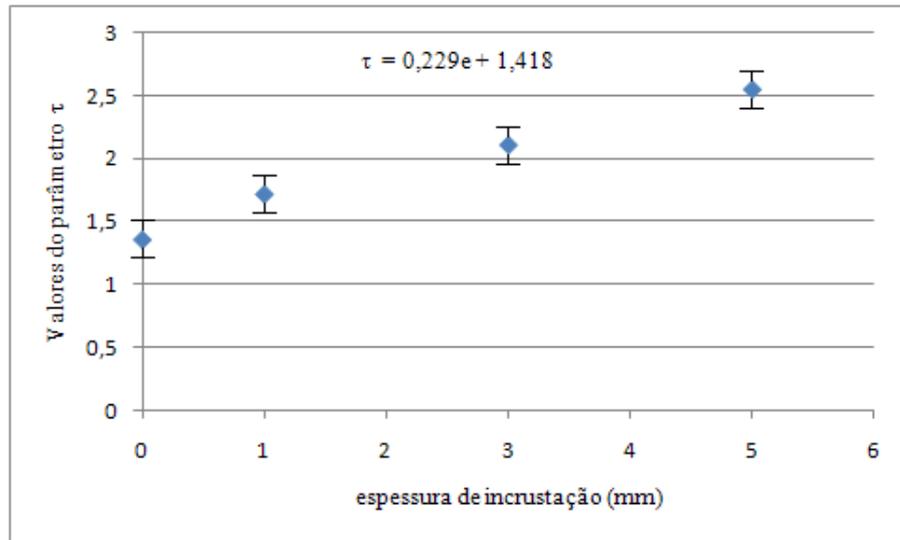


Figura 4.27: Gráfico da variação do parâmetro  $\tau$  em função da incrustação.

O desvio em relação aos valores do parâmetro  $\tau$  para cada ponto no gráfico é igual a 3,5%.

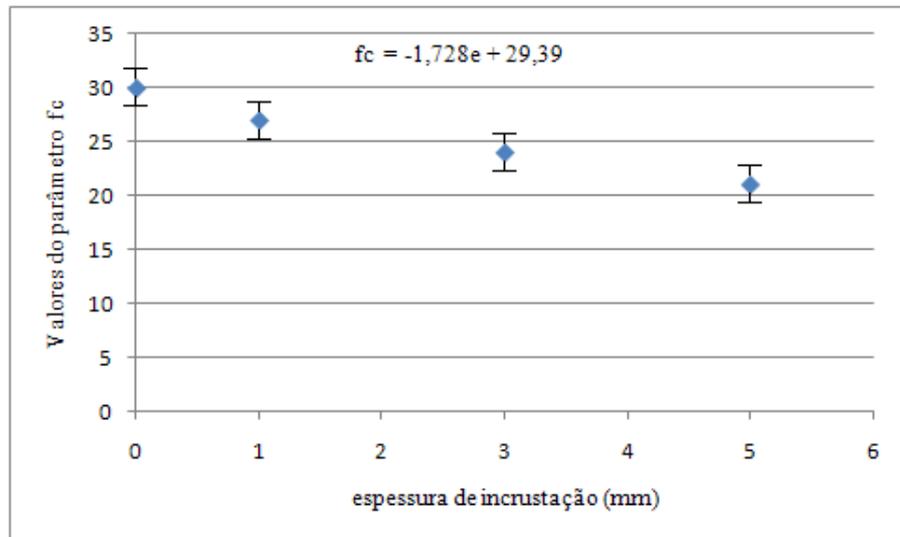


Figura 4.28: Gráfico da variação do parâmetro  $f_c$  em função da incrustação.

O desvio em relação aos valores do parâmetro  $f_c$  para cada ponto no gráfico é igual a 6,2%.

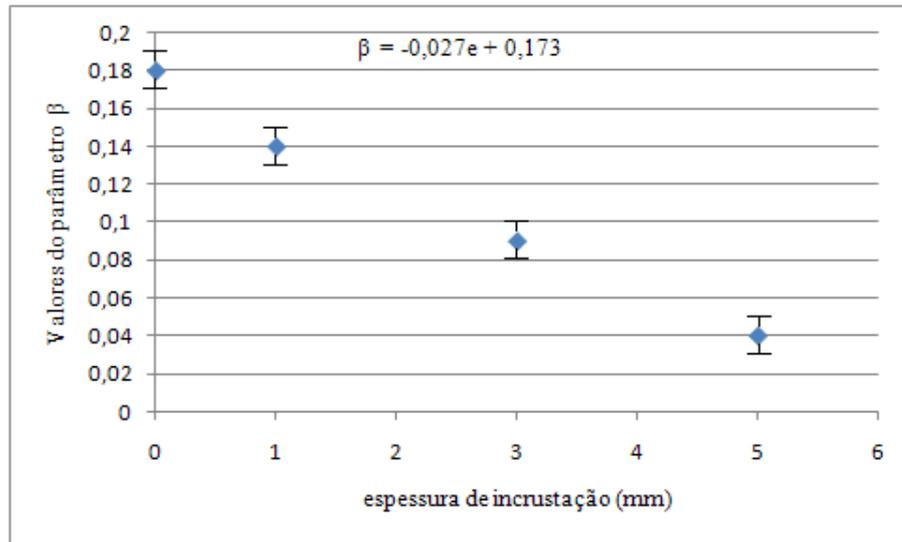


Figura 4.29: Gráfico da variação do parâmetro  $\beta$  em função da incrustação. O desvio em relação aos valores do parâmetro  $\beta$  para cada ponto no gráfico é igual a 5,5%.

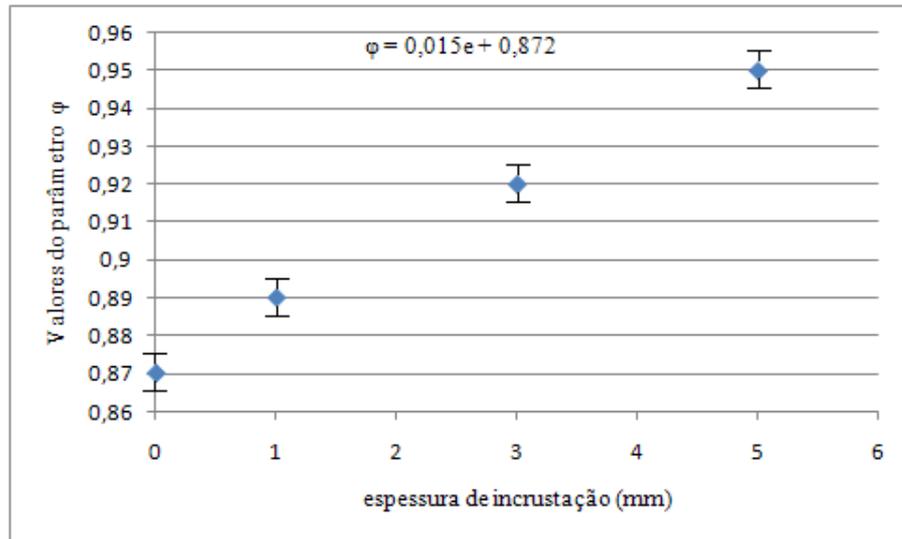


Figura 4.30: Gráfico da variação do parâmetro  $\varphi$  em função da incrustação. O desvio em relação aos valores do parâmetro  $\varphi$  para cada ponto no gráfico é igual a 0,8%.

A partir dos resultados experimentais com esta técnica, as figuras de mérito linearizadas para detecção da incrustação podem ser extraídas:

- A sensibilidade normalizada para o parâmetro  $\alpha$  é  $S_N(\alpha) = -0,03/\text{mm}$ .

- A sensibilidade normalizada para o parâmetro  $\tau$  é  $S_N(\tau)=0,17/\text{mm}$ .
- A sensibilidade normalizada para o parâmetro  $f_c$  é  $S_N(f_c)=-0,06/\text{mm}$ .
- A sensibilidade normalizada para o parâmetro  $\beta$  é  $S_N(\beta)=-0,17/\text{mm}$ .
- A sensibilidade normalizada para o parâmetro  $\varphi$  é  $S_N(\varphi)=-0,02/\text{mm}$ .

Na Figura 4.31 é apresentado um fluxograma para utilização da primeira técnica proposta. Neste caso, realiza-se uma comparação dos parâmetros estimados com os dados da assinatura da tubulação e com isso, se ocorrem modificações nos parâmetros, significa que a tubulação está com incrustação, caso contrário a tubulação não está com incrustação.

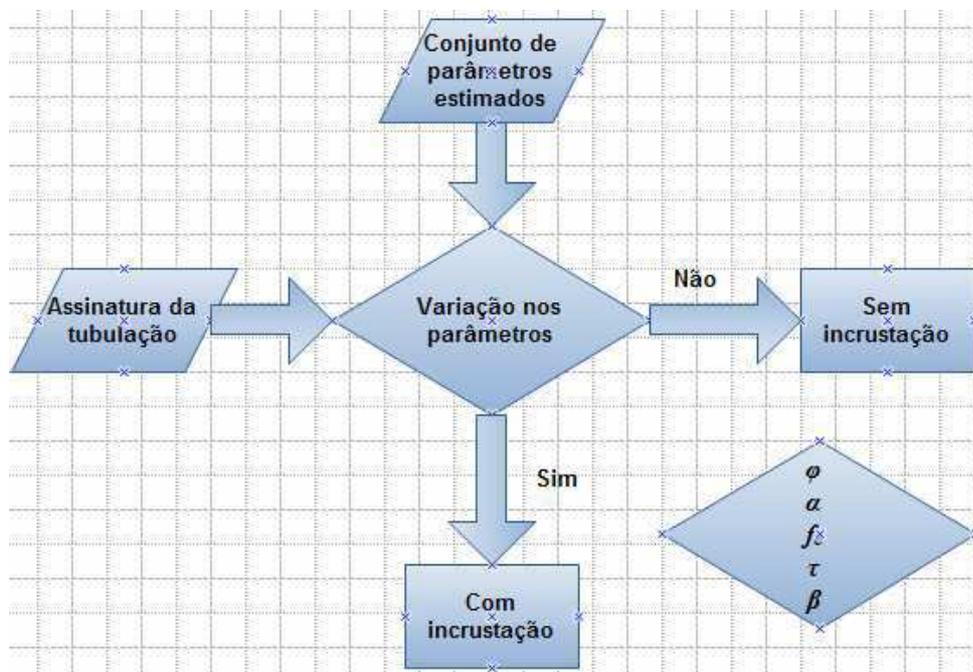


Figura 4.31: Fluxograma para utilização da técnica 1.

## 4.9 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a técnica que utiliza a estimação de parâmetros para a análise de sinais ultra-sônicos para detecção da incrustação. O modelo baseado em pulsos Gaussianos foi o escolhido para analisar os sinais monitorados, para detecção da incrustação em tubulações,

---

pois este modelo é mais completo que outros métodos citados (AR, MUSIC e PRONY), de modo que os seus parâmetros caracterizam os pulsos ultra-sônicos de forma mais precisa. Também foram apresentados os resultados obtidos com simulações e com dados adquiridos através de medições para estimação dos parâmetros do modelo.

A partir do modelo, foram feitas estimações para análise dos pulsos ultra-sônicos. Os métodos utilizados foram baseados no modelo de pulsos Gaussianos, onde os parâmetros representam as propriedades dos pulsos. Por se tratar de um sistema não linear, este problema não pode ser resolvido eficientemente usando métodos de otimização como o método dos mínimos quadrados.

Desta forma, foram desenvolvidos programas para resolver o problema de estimação do sistema não linear. Com o uso da FFT foi possível determinar as frequências que estão presentes nos sinais ultra-sônicos. Com isso as frequências dos pulsos não precisam ser estimadas e o número de parâmetros é reduzido, de forma que o tempo de estimação e o número de iterações também são reduzidos.

Com a primeira técnica proposta é possível analisar modificações em cinco parâmetros estimados para detectar a incrustação, diferentemente de outras técnicas que avaliam apenas um parâmetro para detectar corrosão ou incrustação. Como a composição da incrustação pode modificar de forma diferente os parâmetros observados, a análise de mais de um parâmetro é importante para detectar a presença da incrustação.

Esta técnica tem limites de detecção na faixa de 1 a 10 *mm* de incrustação, considerando as condições de testes utilizadas na plataforma e nas montagens realizadas, tais como: tamanho, espessura, diâmetro e material utilizado na fabricação dos tubos, e da composição das substâncias utilizadas para simular a incrustação.

Considerando a sensibilidade normalizada, os parâmetros tempo de retorno e amplitude apresentam maior variação em relação ao aumento da incrustação.

Pode-se também avaliar diferentes pontos da tubulação e identificar os lugares onde a tubulação apresenta maiores ou menores valores de espessura da incrustação, observando as modificações nos parâmetros estimados para os pulsos ultra-sônicos.

# Capítulo 5

## Detecção de incrustação utilizando ondas guiadas e a transformada Wavelet

### 5.1 Introdução

A técnica anterior permite analisar os sinais ultra-sônicos em determinada frequência, de modo que não é possível avaliar a influência da atenuação nos sinais em outras faixas de frequência.

Assim, na segunda técnica proposta, pretende-se utilizar Wavelets para analisar a atenuação do sinal ultra-sônico, em diferentes faixas de frequência (escalas), e com isso observar a variação da energia dos coeficientes Wavelets, para detecção da incrustação. A análise em diferentes escalas é importante, uma vez que a atenuação é função da absorção, que é função da frequência. Nesta técnica os sinais monitorados também precisam ser processados e programas foram desenvolvidos para determinação dos coeficientes e da energia para análise e detecção da incrustação.

Para geração das ondas guiadas, utilizam-se os circuitos apresentados no Capítulo 4, para excitar o transdutor ultra-sônico transmissor e receber os sinais no receptor [5], [86].

### 5.2 Técnica Proposta usando Wavelets

As Wavelets podem ser utilizadas para análise de sinais transitórios e descontínuos em diferentes faixas de frequência, com informações no tempo.

Como os sinais ultra-sônicos apresentam características (baixa amplitude, alta frequência, mudanças abruptas) para a utilização das Wavelets, na segunda técnica proposta pretende-se utilizar as Wavelets Haar e Daub4, implementadas por filtros digitais, para analisar os sinais ultra-sônicos em diferentes escalas (níveis de resolução), de forma que os coeficientes Wavelets, bem como as energias destes coeficientes possam ser determinados e utilizados para detectar a incrustação nas tubulações monitoradas.

### 5.2.1 Primeiro Nível de Resolução do Algoritmo da TWD

Seja um sinal discreto  $\mathbf{X}$  constituído de  $N$  amostras, sendo  $N$  uma potência de dois. Os vetores de coeficientes  $\mathbf{FPB}_1$  e  $\mathbf{FPA}_1$  do primeiro nível de resolução do algoritmo da TWD para o sinal  $\mathbf{X}$  podem ser calculados como:

$$\mathbf{FPB}_1 = \mathcal{B}_1 \mathbf{X} \quad (5.1a)$$

$$\mathbf{FPA}_1 = \mathcal{A}_1 \mathbf{X} , \quad (5.1b)$$

onde  $\mathcal{B}_1$  e  $\mathcal{A}_1$  são matrizes de ordem  $(N/2) \times N$ , da forma:

$$\mathcal{A}_1 = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & \cdots & h_{L-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & \cdots & h_{L-1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & \cdots & h_{L-1} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h_2 & h_3 & \cdots & h_{L-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & h_0 & h_1 \end{bmatrix} \quad (5.2a)$$

$$\mathcal{B}_1 = \begin{bmatrix} g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & \cdots & g_{L-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & \cdots & g_{L-1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & \cdots & g_{L-1} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ g_2 & g_3 & \cdots & g_{L-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & g_0 & g_1 \end{bmatrix} \quad (5.2b)$$

Observa-se nas equações (5.1) que os vetores de coeficientes  $\mathbf{FPB}_1$  e  $\mathbf{FPA}_1$  tem  $N/2$  elementos cada. Além disso, a partir das equações (5.2), observa-se que as matrizes  $\mathcal{B}_1$  e  $\mathcal{A}_1$  são formadas a partir de deslocamentos circulares das suas primeiras linhas. De fato, aplica-se dois deslocamentos de uma linha para outra, o que representa o processo de decimação das amostras do sinal  $\mathbf{X}$ . Em outras palavras, as linhas das matrizes  $\mathcal{B}_1$  e  $\mathcal{A}_1$  são interpretadas como sendo deslocamentos circulares dos coeficientes dos filtros escala e wavelet do primeiro nível de resolução da TWD, respectivamente.

## 5.2.2 Segundo Nível de Resolução do Algoritmo da TWD

No segundo nível de resolução do algoritmo da TWD, o vetor de coeficientes escala  $\mathbf{FPB}_1$  é tratado da mesma forma que  $\mathbf{X}$  no primeiro nível de resolução, de modo que:

$$\mathbf{FPB}_2 = \mathcal{B}_2 \mathbf{FPB}_1 = \mathcal{B}_2 \mathcal{B}_1 \mathbf{X} \quad (5.3a)$$

$$\mathbf{FPA}_2 = \mathcal{A}_2 \mathbf{FPB}_1 = \mathcal{A}_2 \mathcal{B}_1 \mathbf{X} , \quad (5.3b)$$

onde  $\mathcal{B}_2$  e  $\mathcal{A}_2$  são matrizes de ordem  $(N/4) \times (N/2)$ , da forma:

$$\mathcal{A}_2 = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & \cdots & h_{L-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & \cdots & h_{L-1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & \cdots & h_{L-1} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h_2 & h_3 & \cdots & h_{L-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & h_0 & h_1 \end{bmatrix} \quad (5.4a)$$

$$\mathcal{B}_2 = \begin{bmatrix} g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & \cdots & g_{L-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & \cdots & g_{L-1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & \cdots & g_{L-1} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ g_2 & g_3 & \cdots & g_{L-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & g_0 & g_1 \end{bmatrix} \quad (5.4b)$$

As linhas das matrizes  $\mathcal{B}_2$  e  $\mathcal{A}_2$  representam os filtros do segundo nível de resolução da TWD. Observa-se nas equações (5.3) que os vetores de coeficientes  $\mathbf{FPB}_2$  e  $\mathbf{FPA}_2$  tem  $N/4$  elementos cada. Além disso, a partir das equações (5.4), observa-se que as linhas das matrizes  $\mathcal{B}_2$  e  $\mathcal{A}_2$  são semelhantes às linhas das matrizes  $\mathcal{B}_1$  e  $\mathcal{A}_1$ , respectivamente, com a diferença apenas no número de colunas.

## 5.2.3 $j$ -ésimo Nível de Resolução do Algoritmo da TWD

Analisando-se a formulação do primeiro e segundo níveis de resolução da TWD, pode-se generalizar o cálculo dos vetores de coeficientes  $\mathbf{FPB}_j$  e  $\mathbf{FPA}_j$  para o  $j$ -ésimo nível de resolução do algoritmo:

$$\mathbf{FPB}_j = \underbrace{\mathcal{B}_j \mathcal{B}_{j-1} \cdots \mathcal{B}_1}_{\mathcal{FPB}_j} \mathbf{X} = \mathcal{FPB}_j \mathbf{X} \quad (5.5a)$$

$$\mathbf{FPA}_j = \underbrace{\mathcal{A}_j \mathcal{B}_{j-1} \cdots \mathcal{B}_1}_{\mathcal{FPA}_j} \mathbf{X} = \mathcal{FPA}_j \mathbf{X} , \quad (5.5b)$$

onde  $\mathcal{FPB}_j$  e  $\mathcal{FPA}_j$  são matrizes de ordem  $(N/2^j) \times N$ . Já as matrizes  $\mathcal{B}_j$  e  $\mathcal{A}_j$  são matrizes de ordem  $(N/2^j) \times (N/2^{j-1})$ , cujas linhas são obtidas a partir de deslocamentos circulares dos coeficientes dos filtros escala e wavelet do  $j$ -ésimo nível de resolução, aplicando-se dois deslocamentos de uma linha para outra. Por exemplo, as duas primeiras linhas da matriz  $\mathcal{A}_j$  tem  $N/2^j$  linhas e são escritas como:

$$\begin{array}{cccccccc} h_0 & h_1 & h_2 & \cdots & h_{L-2} & h_{L-1} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N/2^{j-1} - L} \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & \cdots & h_{L-2} & h_{L-1} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N/2^{j-1} - L - 2} \end{array} \quad (5.6)$$

e, de forma análoga, as duas primeiras linhas da matriz  $\mathcal{B}_j$  são escritas como:

$$\begin{array}{cccccccc} g_0 & g_1 & g_2 & \cdots & g_{L-2} & g_{L-1} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N/2^{j-1} - L} \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & \cdots & g_{L-2} & g_{L-1} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N/2^{j-1} - L - 2} \end{array} \quad (5.7)$$

A partir das equações (5.5), observa-se que os vetores de coeficientes  $\mathbf{FPB}_j$  e  $\mathbf{FPA}_j$  para o nível de resolução  $j$  tem  $N/2^j$  elementos cada.

## 5.2.4 Exemplo de Uso da TWD

Para exemplificar o uso da TWD, considere um sinal discreto  $\mathbf{X}$ , definido por oito valores:

$$\mathbf{X} = [4 \ 6 \ 10 \ 12 \ 8 \ 6 \ 5 \ 5]^T. \quad (5.8)$$

Considere a wavelet Haar, cujos filtros possuem os seguintes coeficientes:

$$g_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad g_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad h_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{e} \quad h_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (5.9)$$

A partir das equações (5.6) e (5.7), as matrizes  $\mathcal{B}_j$  e  $\mathcal{A}_j$  para três níveis de resolução são iguais a:

$$\mathcal{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \mathcal{A}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \mathcal{A}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{B}_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \mathcal{A}_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

De acordo com as equações (5.5), os vetores de coeficientes escala  $\mathbf{FPB}_j$  e wavelet  $\mathbf{FPA}_j$  dos três níveis de resolução podem ser calculados como:

$$\mathbf{FPB}_1 = \mathcal{B}_1 \mathbf{X} \quad \text{e} \quad \mathbf{FPA}_1 = \mathcal{A}_1 \mathbf{X} \quad (5.10a)$$

$$\mathbf{FPB}_2 = \mathcal{B}_2 \mathcal{B}_1 \mathbf{X} \quad \text{e} \quad \mathbf{FPA}_2 = \mathcal{A}_2 \mathcal{B}_1 \mathbf{X} \quad (5.10b)$$

$$\mathbf{FPB}_3 = \mathcal{B}_3 \mathcal{B}_2 \mathcal{B}_1 \mathbf{X} \quad \text{e} \quad \mathbf{FPA}_3 = \mathcal{A}_3 \mathcal{B}_2 \mathcal{B}_1 \mathbf{X} \quad (5.10c)$$

Dessa forma, obtêm-se:

$$\mathbf{FPB}_1 = \begin{bmatrix} 10 & 22 & 14 & 10 \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{bmatrix}^T \quad \text{e} \quad \mathbf{FPA}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{2}{\sqrt{2}} & -\frac{2}{\sqrt{2}} & \frac{2}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{FPB}_2 = [16 \quad 12]^T \quad \text{e} \quad \mathbf{FPA}_2 = [-6 \quad 2]^T$$

$$\mathbf{FPB}_3 = \begin{bmatrix} 28 \\ \sqrt{2} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{FPA}_3 = \begin{bmatrix} 4 \\ \sqrt{2} \end{bmatrix}$$

### 5.2.5 Cálculo da energia

Para determinar o espectro de energia  $\mathcal{E}_j(k)$  dos coeficientes Wavelets na escala  $j$ , utiliza-se a seguinte expressão:

$$\mathcal{E}_j(k) = \sum_{n=k}^{k+N_w} c_j^2(n), \quad (5.11)$$

onde:  $c_j$  são os coeficientes Wavelets;  $N_w$  é o comprimento da janela;  $k = \{0, 2, \dots, N_j - (N_w - 1)\}$  e  $N_j$  é o número de coeficientes na escala  $j$ .

### 5.3 Resultados obtidos com a determinação dos coeficientes Wavelets

Uma fase preliminar de calibração para definição da assinatura da tubulação inicialmente é realizada, nesta fase a tubulação é toda limpa de forma que não exista nenhuma incrustação na mesma. Assim os transdutores podem ser excitados e os sinais recebidos podem ser monitorados, e os coeficientes Wavelets podem ser determinados e são tomados como referência para detecção da incrustação.

Para realização dos testes com esta técnica utiliza-se o seguinte procedimento: inicialmente excita-se o transdutor transmissor (ultra-sônico), para gerar as ondas guiadas ultra-sônicas pela tubulação; adquire-se o sinal detectado pelo transdutor receptor (ultra-sônico); e com os sinais adquiridos, determina-se os coeficientes Wavelets e as energias destes coeficientes, para observar as variações destes parâmetros com a presença da incrustação.

Observando as variações nos dados obtidos com a plataforma desenvolvida, alguns experimentos foram selecionados para serem analisados. Esta escolha foi realizada observando as variações nos parâmetros dos sinais ultra-sônicos medidos, pois como a incrustação é um processo aleatório e descontínuo, algumas medições não apresentam variações.

Os dados obtidos com os experimentos com a tubulação limpa (sinal de referência) e com um experimento onde a tubulação possui 1 *mm* de incrustação (sinal de comparação), para o sinal de saída do receptor, são ilustrados nas Figuras 5.1 e 5.2 respectivamente.

Com os dados obtidos foi possível aplicar a transformada Wavelet discreta e determinar os coeficientes Wavelets para os sinais ultra-sônicos medidos, utilizando as Wavelets Haar e Daub4, devido as suas características, tais como:

- A Wavelet Haar é a mais simples e tem sido utilizada para detectar variações abruptas do sinal, isto é, uma característica de localização no espaço físico;
- A Wavelet Daubechies (Daub4) é utilizada em diversas aplicações pois é adaptada para detectar pequenas amplitudes, curta duração, rápido decaimento e oscilações para diversos tipos de sinais.

Estas características estão presentes nos sinais ultra-sônicos, por isso a escolha destas Wavelets para análise dos sinais. Desta forma avalia-se as modificações nos coeficientes Wavelets quando a incrustação está presente nas tubulações. Utilizando programas desenvolvidos em

C++ e utilizando o MATLAB foi possível plotar os gráficos dos coeficientes Wavelets determinados.

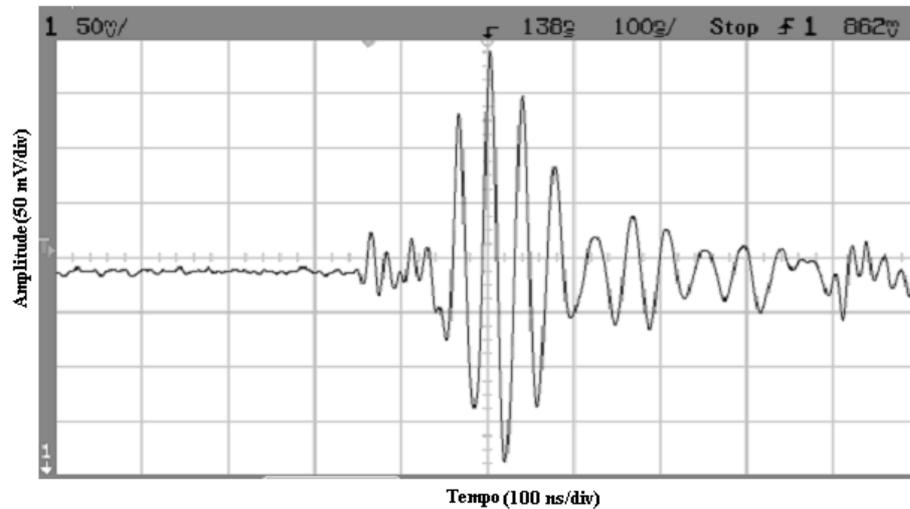


Figura 5.1: Forma de onda do sinal de saída do receptor sem incrustação (Sinal de referência).

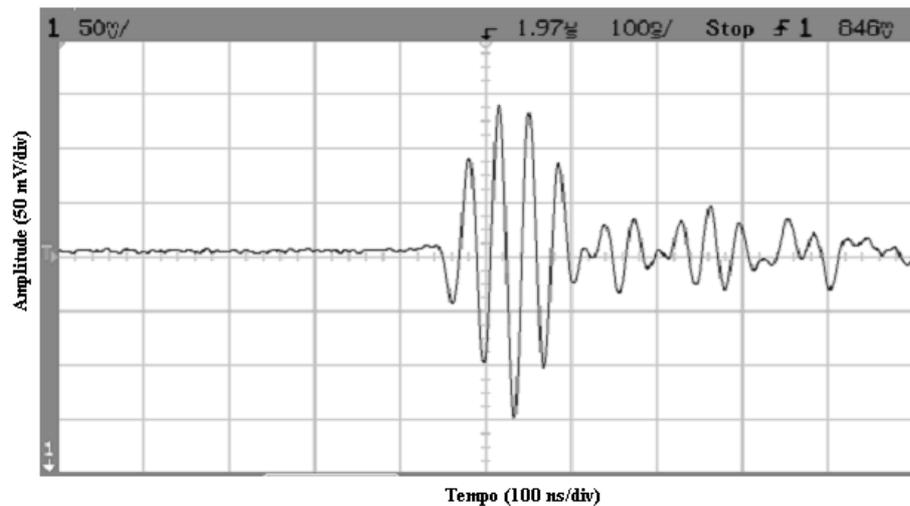


Figura 5.2: Forma de onda do sinal de saída do receptor com 1 mm de incrustação (Sinal de comparação).

Inicialmente foram determinados os coeficientes Wavelets para os experimentos com o sinal de referência e com o sinal de comparação, utilizando a Wavelet Haar. Os resultados obtidos para o experimento com o sinal de referência para as escalas 1 e 3 estão apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4 respectivamente. Os resultados obtidos para o experimento com o sinal de comparação

para as escalas 1 e 3 estão apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6 respectivamente. Estas figuras apresentam os resultados obtidos com os filtros passa-baixa (FPB) para as aproximações, e com os filtros passa-alta (FPA) para os detalhes do sinal.

Analisando os resultados obtidos, pode-se observar que com o aumento da incrustação ocorre uma redução nos valores dos coeficientes Wavelets para os sinais ultra-sônicos, e isto é uma indicação da presença da incrustação nas tubulações monitoradas. Pode-se observar também que com o aumento das escalas (redução na faixa de frequência), a interferência do ruído de vibração é reduzida tornando o sinal mais suave.

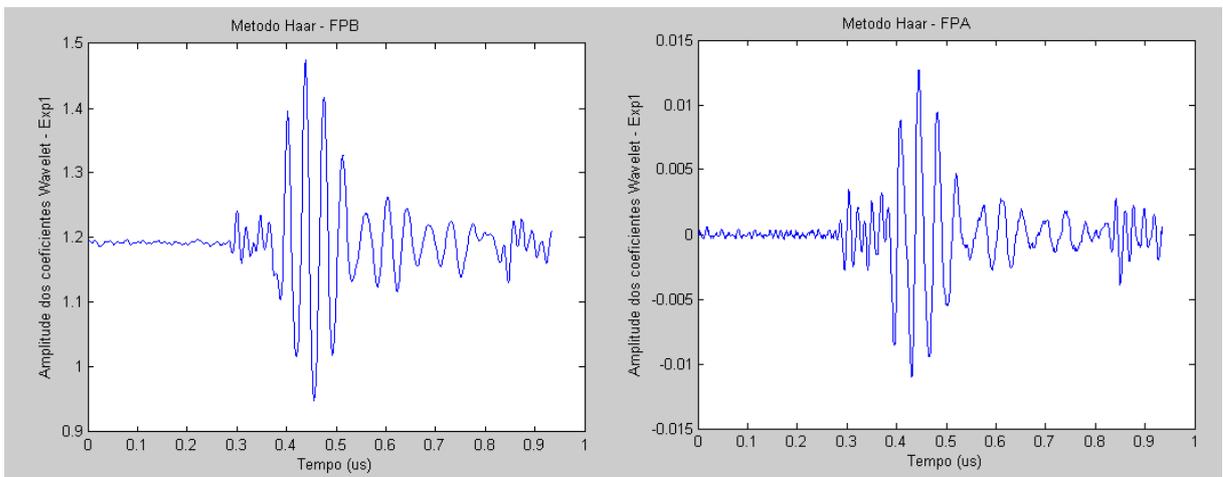


Figura 5.3: Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para escala 1 (Tubulação sem incrustação).

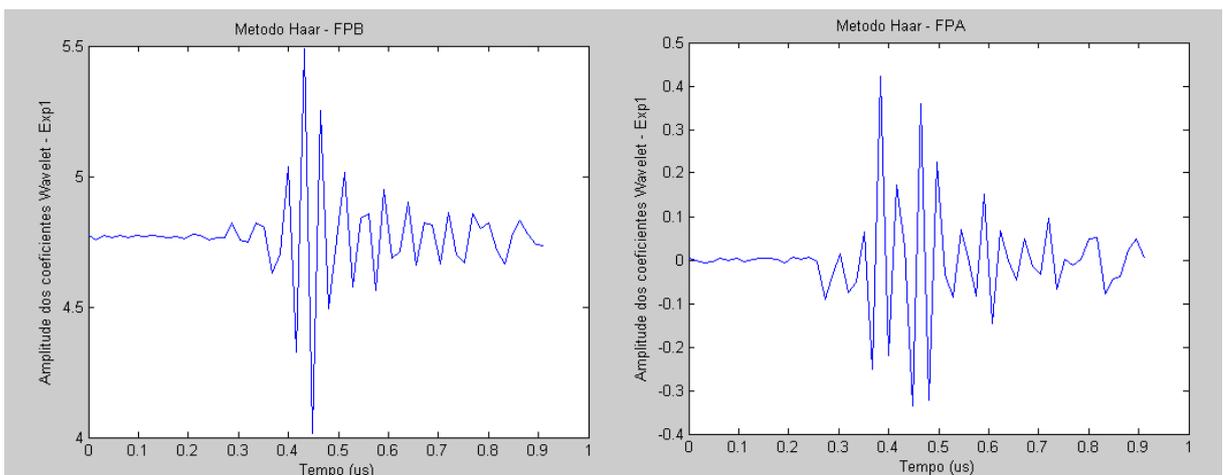


Figura 5.4: Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para escala 3 (Tubulação sem incrustação).

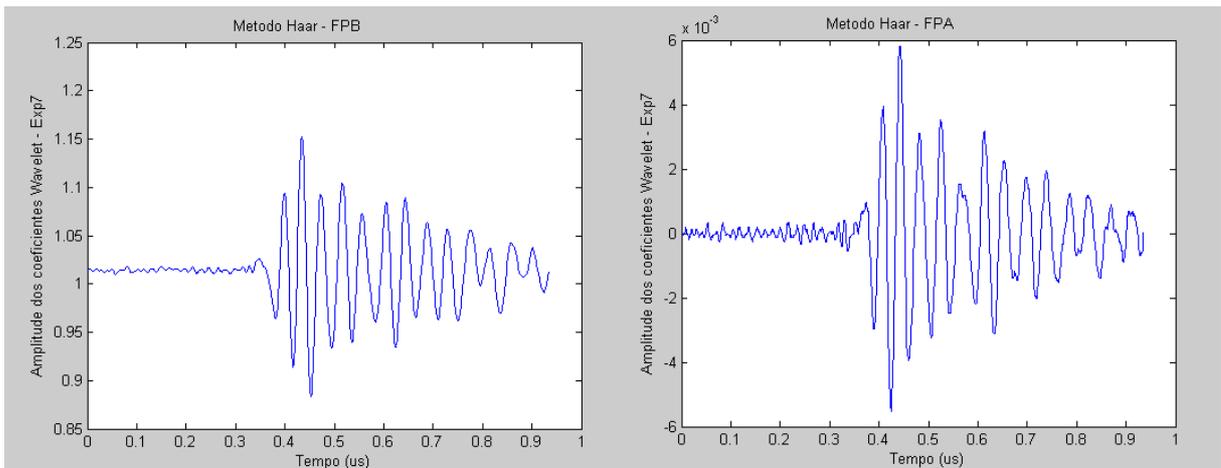


Figura 5.5: Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para escala 1 (Tubulação com 1 *mm* de incrustação).

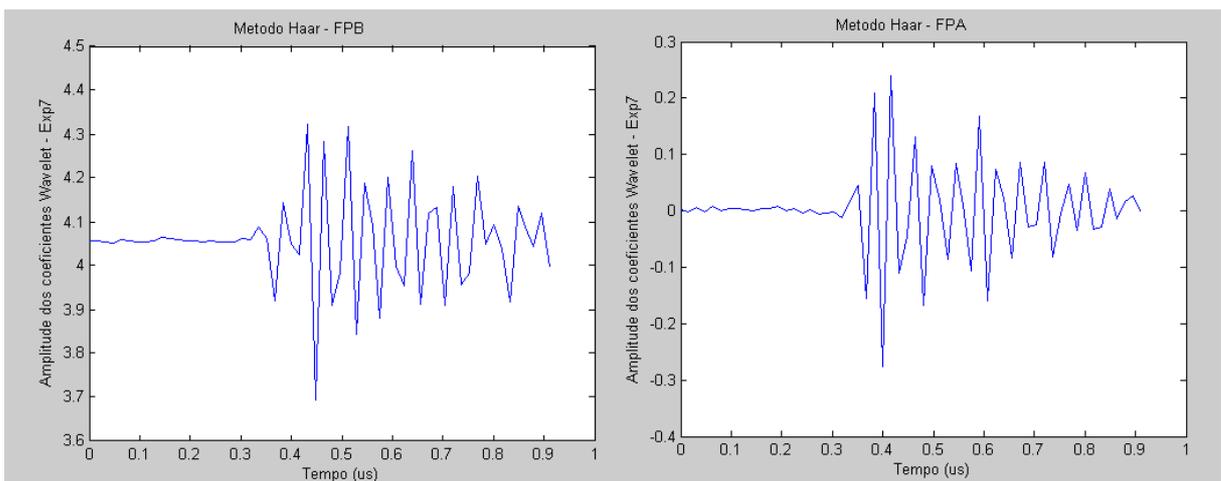


Figura 5.6: Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para escala 3 (Tubulação com 1 *mm* de incrustação).

Em seguida foram determinados os coeficientes Wavelets para os experimentos com o sinal de referência e com o sinal de comparação, utilizando a Wavelet Daub4. Os resultados obtidos para o experimento com o sinal de referência para as escalas 1 e 3 estão apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8 respectivamente. Os resultados obtidos para o experimento com o sinal de comparação para as escalas 1 e 3 estão apresentados nas Figuras 5.9 e 5.10 respectivamente. Estas figuras apresentam os resultados obtidos com os filtros passa-baixa (FPB) para as aproximações, e com os filtros passa-alta (FPA) para os detalhes do sinal.

Da mesma forma que no caso da Wavelet Haar, pode-se observar que com o aumento da incrustação ocorre uma redução nos valores dos coeficientes Wavelets para os sinais ultrassônicos, e isto é uma indicação da presença da incrustação nas tubulações monitoradas. Os coeficientes Wavelets da Wavelet Daub4 são diferentes da Haar devido as suas características, como a forma destas Wavelets.

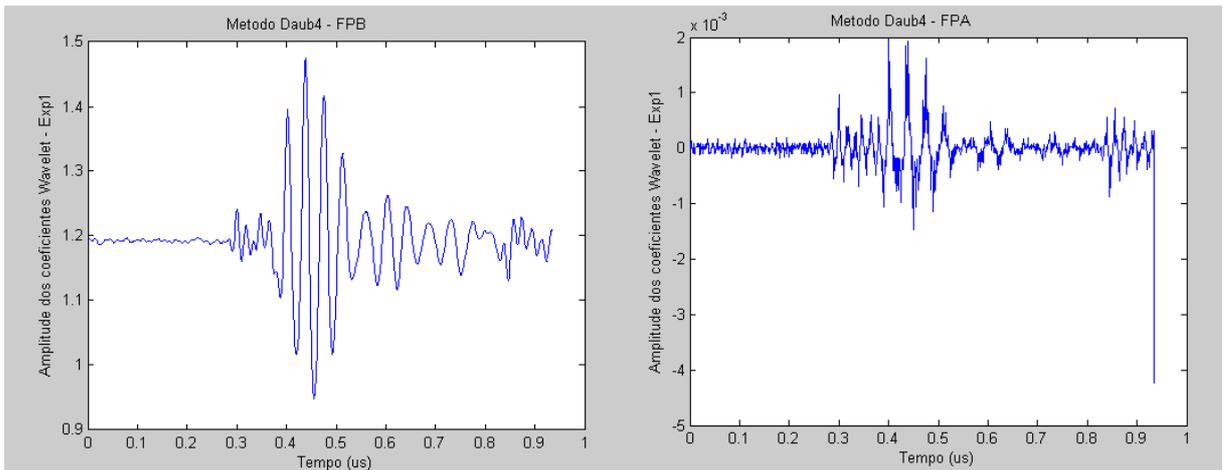


Figura 5.7: Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para escala 1 (Tubulação sem incrustação).

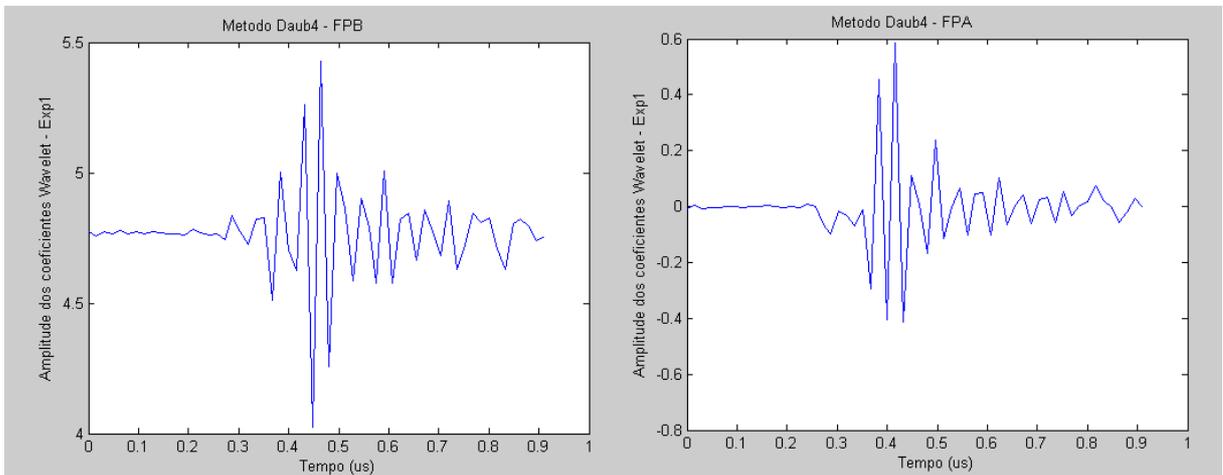


Figura 5.8: Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para escala 3 (Tubulação sem incrustação).

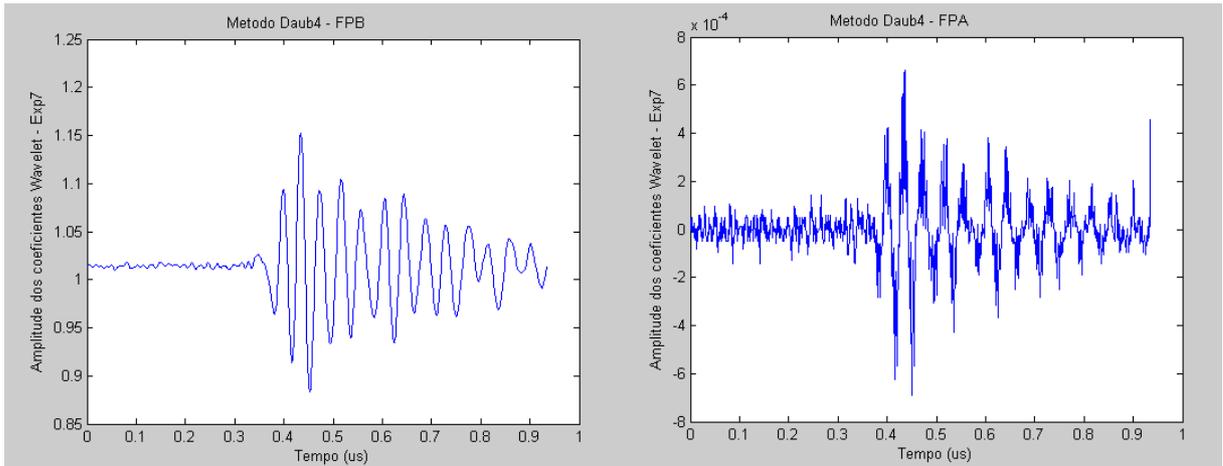


Figura 5.9: Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para escala 1 (Tubulação com 1 *mm* de incrustação).

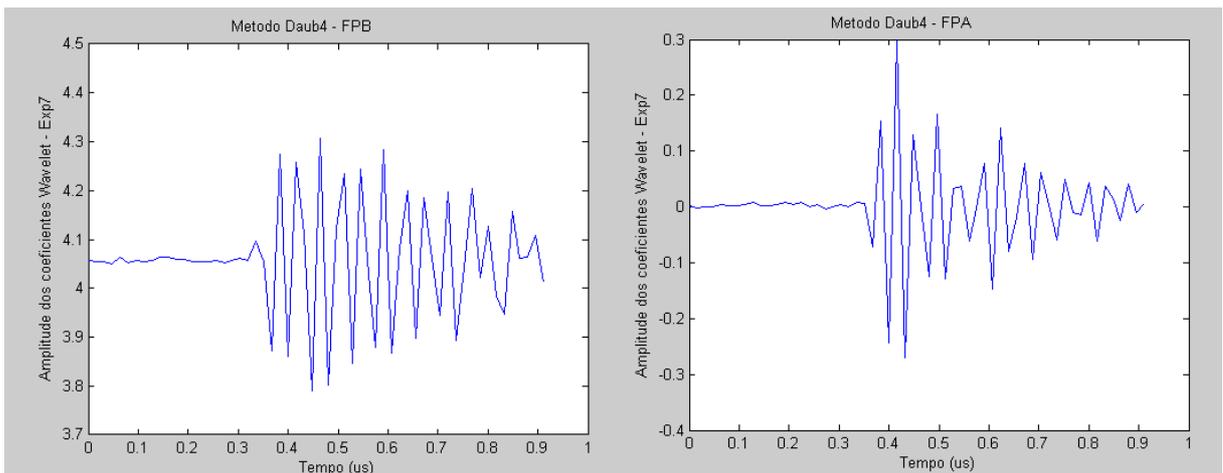


Figura 5.10: Gráfico dos Coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para escala 3 (Tubulação com 1 *mm* de incrustação).

## 5.4 Resultados obtidos com a determinação da energia dos coeficientes Wavelets

A energia é uma importante variável na análise de sinais e a sua distribuição com a mudança de tempo e frequência podem mostrar as características do sinal. Com o uso de Wavelets pode-se analisar a distribuição de energia do sinal com a mudança do tempo em diferentes faixas

de frequência. Com isso pretende-se determinar as energias dos coeficientes Wavelet dos sinais ultra-sônicos e observar modificações nestas energias quando o processo de incrustação ocorrer.

Após determinar os coeficientes Wavelets para os sinais ultra-sônicos utilizando as Wavelets Haar e Daub4, foram calculadas as energias dos coeficientes Wavelets destes sinais.

Os resultados obtidos com o cálculo da energia para os coeficientes Wavelets para os experimentos realizados, utilizando as escalas 1 e 3, com a Wavelet Haar estão apresentados nas Figuras 5.11 e 5.12 respectivamente.

Analisando os resultados, pode-se observar que o aumento da incrustação provoca uma redução na energia dos coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar. Isto pode ser notado tomando como referência o sinal onde a tubulação está limpa, ou seja, sem incrustação, e observando a redução da energia dos coeficientes com a presença da incrustação. Pode-se notar também que com o aumento da escala (redução na faixa de frequência), o sinal torna-se mais suave, ou seja, com menos interferência do ruído de vibração.

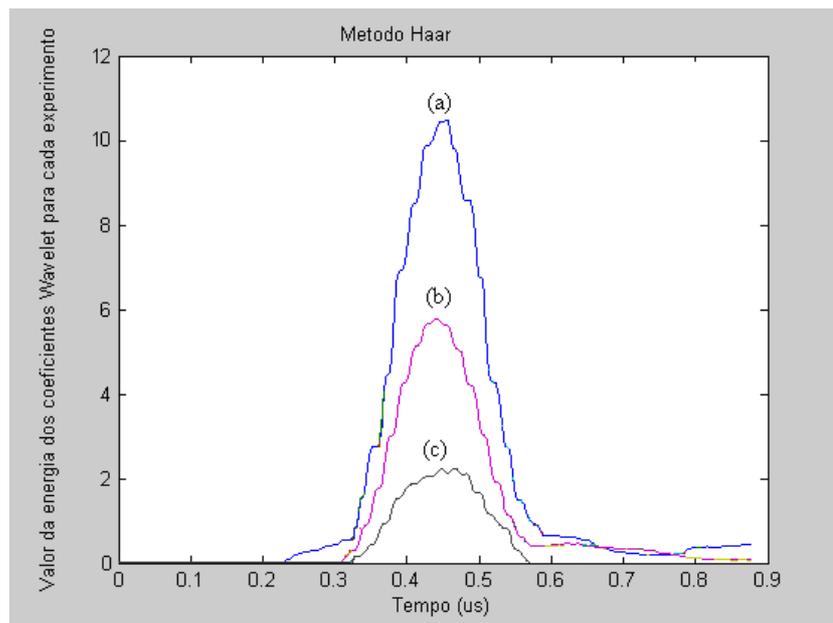


Figura 5.11: Gráfico da Energia dos coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para os experimentos sem incrustação (a), com 1 *mm* de incrustação (b) e com 3 *mm* de incrustação (c) (Escala 1).

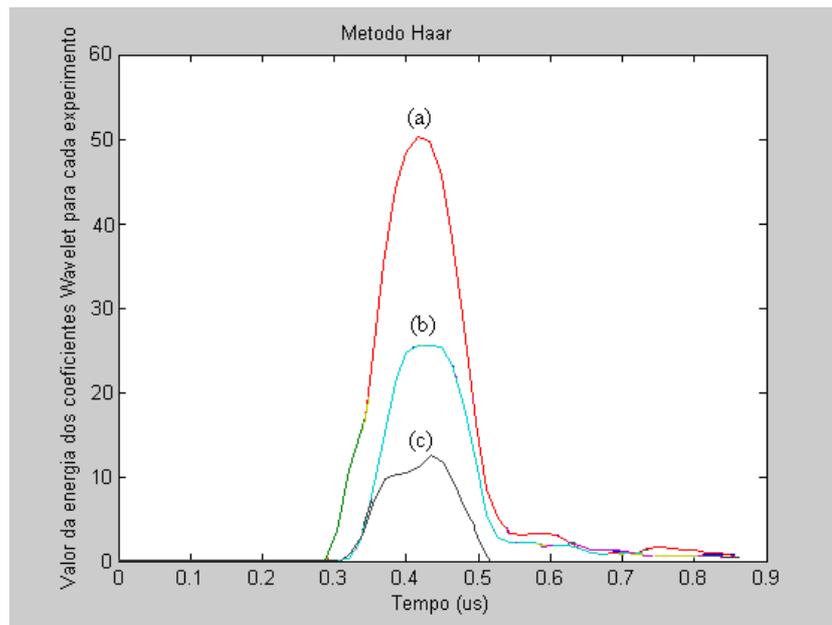


Figura 5.12: Gráfico da Energia dos coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Haar para os experimentos sem incrustação (a), com 1 mm de incrustação (b) e com 3 mm de incrustação (c) (Escala 3).

Os resultados obtidos com o cálculo da energia para os coeficientes Wavelets para os experimentos realizados, utilizando as escalas 1 e 3, com a Wavelet Daub4 estão apresentados nas Figuras 5.13 e 5.14 respectivamente.

Da mesma forma que ocorreu com o uso da Wavelet Haar, pode-se observar que o aumento da incrustação provoca uma redução na energia dos coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4. Isto pode ser notado tomando como referência o experimento onde a tubulação está limpa, ou seja, sem incrustação, e observando a redução da energia dos coeficientes com a presença da incrustação. A diferença nos valores das energias utilizando as Wavelets Haar e Daub4 são devido as suas características e formas, como apresentadas no Capítulo 3.

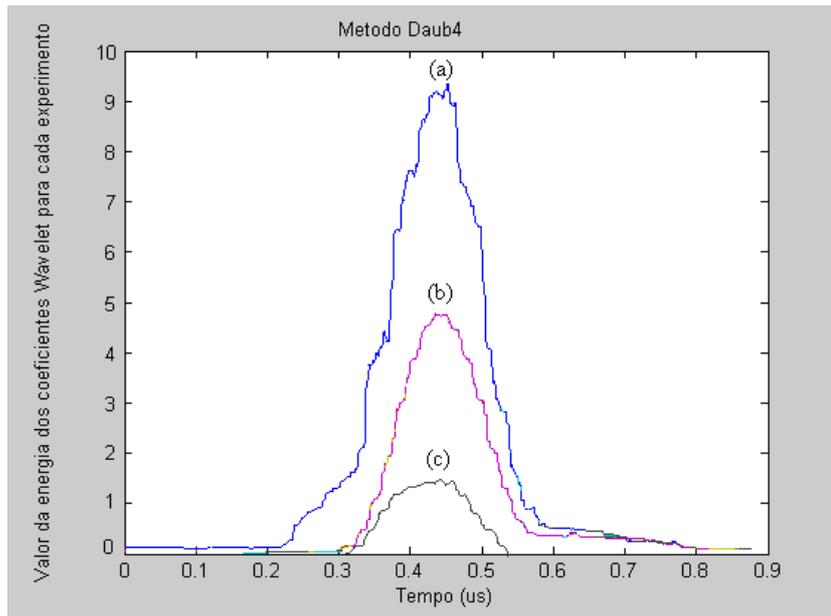


Figura 5.13: Gráfico da Energia dos coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para os experimentos sem incrustação (a), com 1 *mm* de incrustação (b) e com 3 *mm* de incrustação (c) (Escala 1).

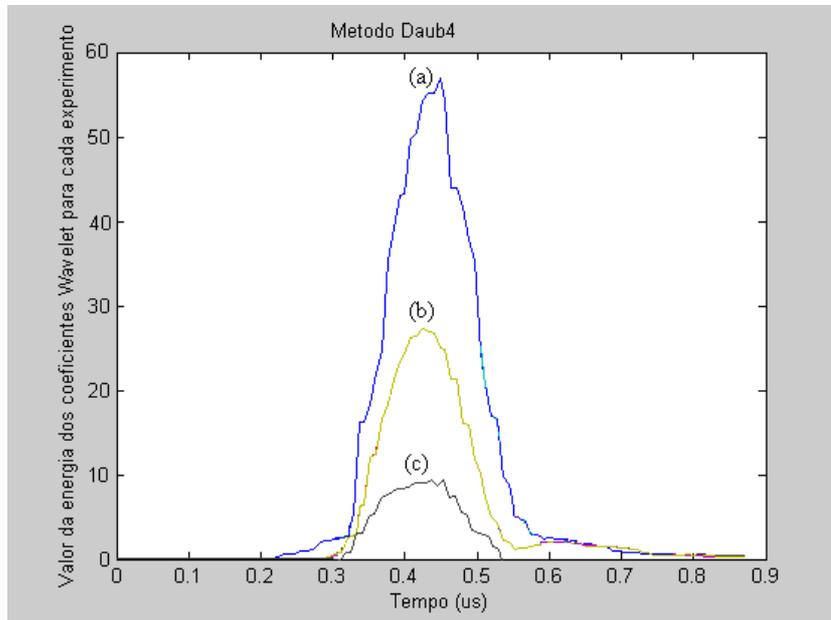


Figura 5.14: Gráfico da Energia dos coeficientes Wavelets utilizando a Wavelet Daub4 para os experimentos sem incrustação (a), com 1 *mm* de incrustação (b) e com 3 *mm* de incrustação (c) (Escala 3).

---

Com o aumento da escala, há uma redução na atenuação, de forma que as amplitudes dos coeficientes e os valores máximos das energias são maiores. Isto ocorre devido a redução nos valores das frequências com o aumento da escala, uma vez que a atenuação é função da frequência.

Observando as reduções nas energias dos coeficientes Wavelets, a incrustação pode ser detectada, uma vez que a energia determinada para a tubulação limpa é tomada como referência e as reduções na energia são atribuídas a incrustação, que pode ser observada dentro das tubulações da plataforma de testes [87-89].

A energia pode ser avaliada em relação ao valor máximo encontrado, ou pode-se calcular a área abaixo da curva de energia (cálculo da integral). A motivação para a utilização de Wavelets é que a informação pode ser observada nos domínios do tempo e da frequência, ou seja, pode-se analisar o sinal em diferentes faixas de frequência, observando o comportamento no tempo dos coeficientes. A escolha da Wavelet mãe se dá de acordo com as características do sinal estudado, ou seja, para sinais com baixa amplitude, alta frequência e mudanças abruptas, as Wavelets Haar e Daud4 foram escolhidas, pois estas wavelets são indicadas para estes tipos de sinais, uma vez que os sinais estudados apresentam estas características.

A explicação para a perda de energia é devido à mudança de impedância acústica (produto da velocidade de propagação pela densidade) que é introduzida com a formação da incrustação, ou seja, quando a onda propagada encontra uma nova interface (incrustação) com impedância acústica diferente do ferro galvanizado, parte do sinal se propaga pela nova interface, reduzindo assim a energia do sinal original propagado. Com isso a criação da nova interface provoca a redução na energia do sinal, e como a impedância acústica é função da velocidade e densidade do meio, a composição da incrustação pode provocar diferentes variações.

Nas tubulações monitoradas, o que mais influencia nos sinais recebidos é a espessura da incrustação, ou seja, quando ela aumenta, provoca modificações no sinal recebido. As bolhas de cavitação não interferem na propagação do sinal, pois o mesmo só se propaga pela tubulação e pela nova interface criada pela incrustação, e nunca no líquido, pois as ondas transversais não podem se propagar em líquidos, uma vez que a rigidez é muito baixa e a velocidade de propagação da onda transversal é função da rigidez do meio; portanto as ondas guiadas não se propagam em líquidos [1], [18].

## 5.5 Critério de sensibilidade para segunda técnica proposta

Os critérios de sensibilidade para os valores máximos de energia em relação ao aumento da espessura de incrustação (sensibilidade relativa) podem ser definidos como:

$$S_i(E_{H1}) = \frac{\Delta E_{H1}}{\Delta e} \quad (5.12)$$

onde:  $\Delta E_{H1}$  é a variação do valor máximo da energia utilizando a Wavelet Haar na escala 1 e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

$$S_i(E_{H3}) = \frac{\Delta E_{H3}}{\Delta e} \quad (5.13)$$

onde:  $\Delta E_{H3}$  é a variação do valor máximo da energia utilizando a Wavelet Haar na escala 3 e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

$$S_i(E_{D1}) = \frac{\Delta E_{D1}}{\Delta e} \quad (5.14)$$

onde:  $\Delta E_{D1}$  é a variação do valor máximo da energia utilizando a Wavelet Daub4 na escala 1 e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

$$S_i(E_{D3}) = \frac{\Delta E_{D3}}{\Delta e} \quad (5.15)$$

onde:  $\Delta E_{D3}$  é a variação do valor máximo da energia utilizando a Wavelet Daub4 na escala 3 e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

Pode-se definir também a sensibilidade normalizada  $S_N$ , em relação aos valores máximos de energia de referência, ou seja, dividindo a sensibilidade relativa pelos valores máximos de energia obtidos com a tubulação sem incrustação.

Os critérios de sensibilidade normalizada para os valores máximos de energia em relação ao aumento da espessura de incrustação podem ser definidos como:

$$S_N(E_{H1}) = \frac{\frac{\Delta E_{H1}}{\Delta e}}{E_{H1}(0)} \quad (5.16)$$

onde:  $E_{H1}(0)$  é o valor máximo da energia para tubulação sem incrustação utilizando a Wavelet Haar na escala 1.

$$S_N(E_{H3}) = \frac{\frac{\Delta E_{H3}}{\Delta e}}{E_{H3}(0)} \quad (5.17)$$

onde:  $E_{H3}(0)$  é o valor máximo da energia para tubulação sem incrustação utilizando a Wavelet Haar na escala 3.

$$S_N(E_{D1}) = \frac{\frac{\Delta E_{D1}}{\Delta e}}{E_{D1}(0)} \quad (5.18)$$

onde:  $E_{D1}(0)$  é o valor máximo da energia para tubulação sem incrustação utilizando a Wavelet Daub4 na escala 1.

$$S_N(E_{D3}) = \frac{\frac{\Delta E_{D3}}{\Delta e}}{E_{D3}(0)} \quad (5.19)$$

onde:  $E_{D3}(0)$  é o valor máximo da energia para tubulação sem incrustação utilizando a Wavelet Daub4 na escala 3.

Os resultados obtidos com a variação dos valores máximos da energia em função do aumento da incrustação estão apresentados nas Figuras 5.15 a 5.18.

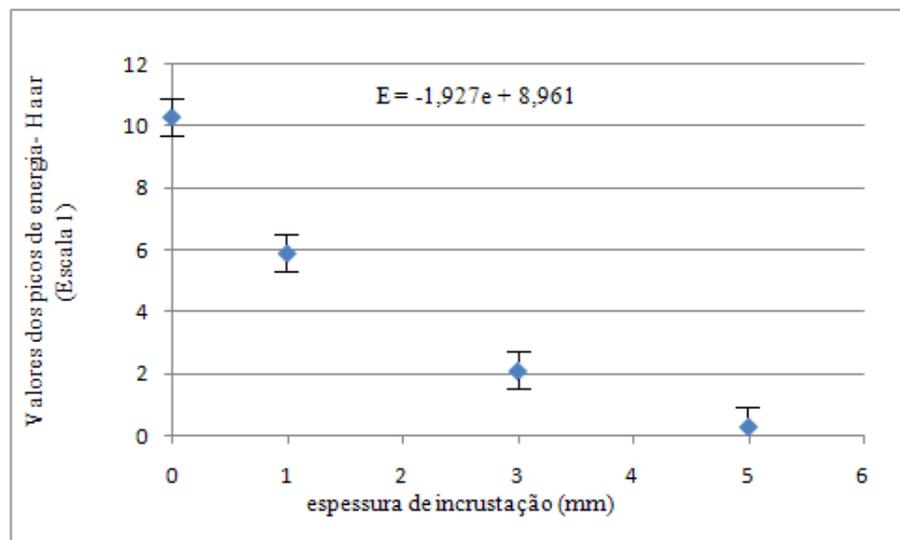


Figura 5.15: Gráfico da variação dos valores máximos da energia, utilizando a Wavelet Haar na escala 1, em função da incrustação.

O desvio em relação aos valores máximos da energia  $E_{H1}$  para cada ponto no gráfico é igual a 4,2%.

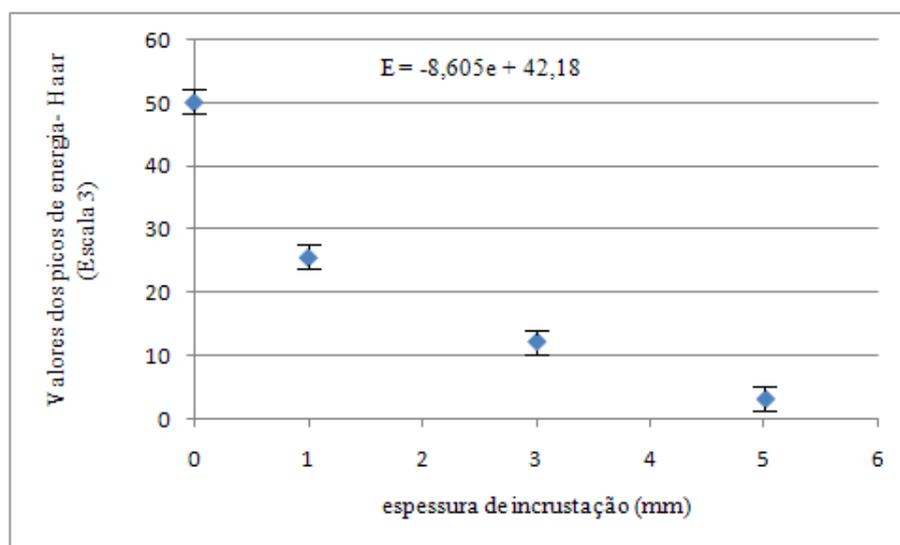


Figura 5.16: Gráfico da variação dos valores máximos da energia, utilizando a Wavelet Haar na escala 3, em função da incrustação.

O desvio em relação aos valores máximos da energia  $E_{H3}$  para cada ponto no gráfico é igual a 5,3%.

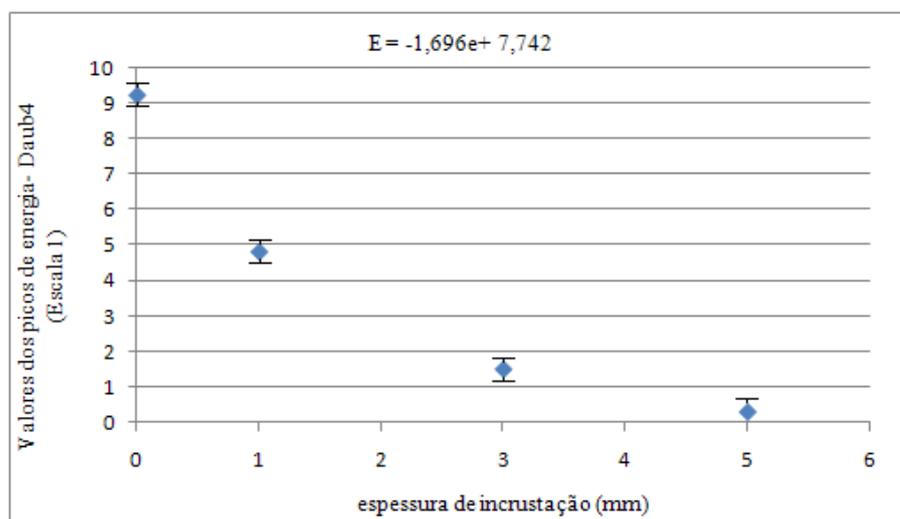


Figura 5.17: Gráfico da variação dos valores máximos da energia, utilizando a Wavelet Daub4 na escala 1, em função da incrustação.

O desvio em relação aos valores máximos da energia  $E_{D1}$  para cada ponto no gráfico é igual a 4,5%.

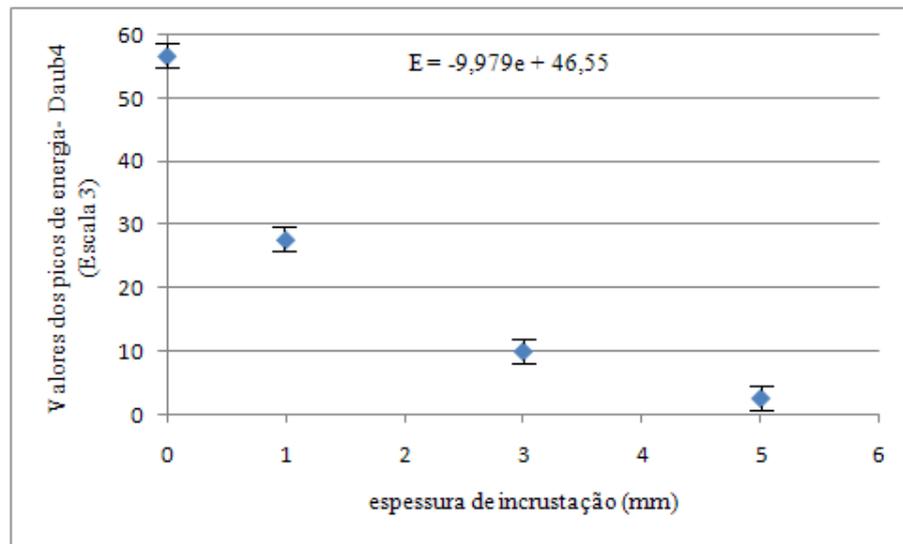


Figura 5.18: Gráfico da variação dos valores máximos da energia, utilizando a Wavelet Daub4 na escala 3, em função da incrustação.

O desvio em relação aos valores máximos da energia  $E_{D3}$  para cada ponto no gráfico é igual a 5,5%.

A partir dos resultados experimentais com esta técnica, as figuras de mérito linearizadas para detecção da incrustação podem ser extraídas:

- A sensibilidade normalizada para a energia utilizando a Wavelet Haar na escala 1 é  $S_N(E_{H1})=-0,17/\text{mm}$ .
- A sensibilidade normalizada para a energia utilizando a Wavelet Haar na escala 3 é  $S_N(E_{H3})=-0,18/\text{mm}$ .
- A sensibilidade normalizada para a energia utilizando a Wavelet Daub4 na escala 1 é  $S_N(E_{D1})=-0,17/\text{mm}$ .
- A sensibilidade normalizada para a energia utilizando a Wavelet Daub4 na escala 3 é  $S_N(E_{D3})=-0,18/\text{mm}$ .

Na Figura 5.19 é apresentado um fluxograma para utilização da segunda técnica proposta. Neste caso, aplica-se a transformada Wavelet sobre um conjunto de pontos obtidos a partir dos sinais monitorados, realiza-se uma comparação com os dados da assinatura da tubulação e com isso, se ocorrem modificações nos parâmetros, significa que a tubulação está com incrustação, caso contrário a tubulação não está com incrustação.

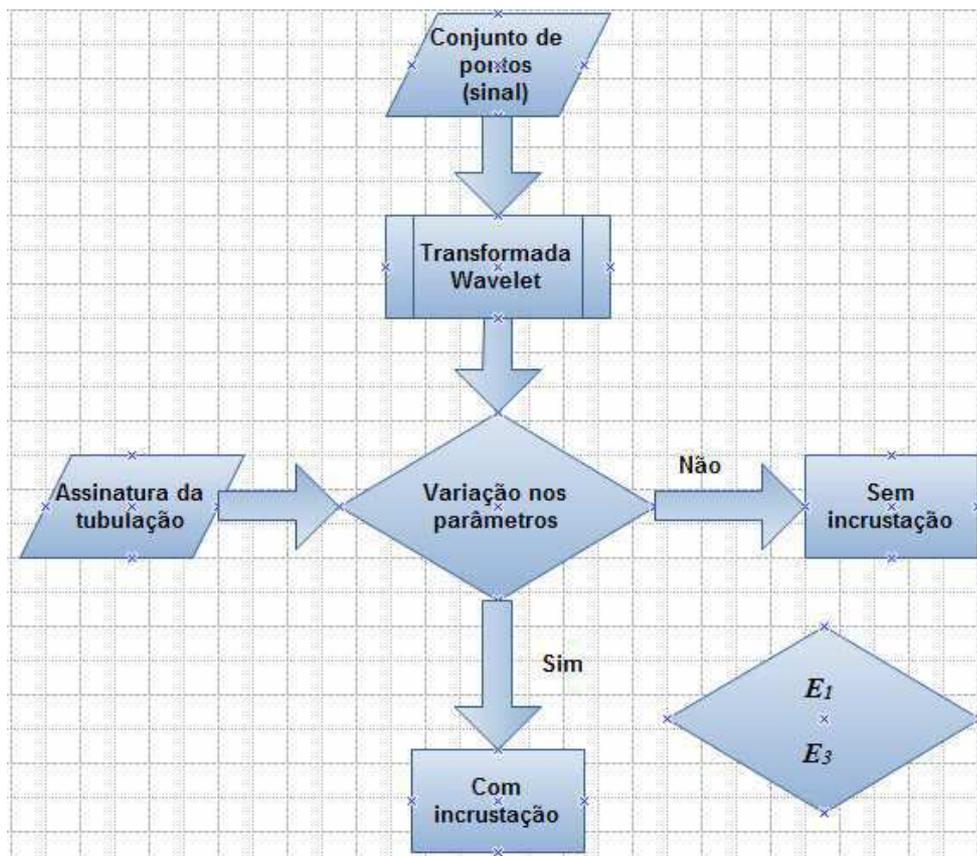


Figura 5.19: Fluxograma para utilização da técnica 2.

## 5.6 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os resultados da utilização de Wavelets para detecção da incrustação em tubulações, com ondas guiadas ultra-sônicas. Com os dados obtidos foi possível determinar os coeficientes Wavelets para os sinais ultra-sônicos medidos, utilizando as Wavelets Haar e Daub4.

Analisando os resultados obtidos, pode-se observar que com o aumento da incrustação ocorre uma redução nos valores dos coeficientes Wavelets para os sinais ultra-sônicos, e isto é uma indicação da presença da incrustação nas tubulações monitoradas.

Pode-se observar também que o aumento da incrustação provoca uma redução na energia dos coeficientes Wavelets utilizando as Wavelets Haar e Daub4. Isto pode ser notado tomando como referência o experimento onde a tubulação está limpa, ou seja, sem incrustação, e observando

a redução da energia dos coeficientes com a presença da incrustação.

Com isso, observando-se as reduções nas energias dos coeficientes Wavelets, a incrustação pode ser detectada em diferentes escalas, uma vez que a energia determinada para a tubulação limpa é tomada como referência e as reduções na energia são atribuídas a incrustação, que pode ser observada dentro das tubulações da plataforma de testes. Pode-se também avaliar diferentes pontos da tubulação e identificar os lugares onde a tubulação apresenta maiores ou menores valores de espessura de incrustação observando as modificações nos valores das energias.

Com a segunda técnica proposta é possível analisar os sinais em diferentes faixas de frequência, de modo que pode-se verificar a influência da atenuação em cada faixa, para avaliar a presença da incrustação nas tubulações. Desta forma, em altas frequências, onde a atenuação é maior, as modificações nos sinais monitorados podem ser tão pequenas tornando-se imperceptíveis. Com o aumento das escalas, redução na faixa de frequência, a relação sinal/ruído aumenta, permitindo avaliar com mais clareza as modificações nos coeficientes Wavelets determinados e conseqüentemente na energia destes coeficientes.

Esta técnica tem limites de detecção na faixa de 1 a 10 *mm* de incrustação, considerando as mesmas condições de testes utilizadas na plataforma e nas montagens que foram realizadas com a técnica baseada na estimação de parâmetros proposta, uma vez que estas técnicas utilizam o método de ondas guiadas ultra-sônicas.

Considerando a sensibilidade normalizada, os valores máximos da energia na terceira escala apresentam maior variação em relação ao aumento da incrustação.

# Capítulo 6

## Detecção de incrustação utilizando análises de vibrações

### 6.1 Introdução

Na terceira técnica proposta, são realizadas medições com um acelerômetro e um microfone para análise das amplitudes, frequências e tempo de decaimento dos sinais monitorados. Neste caso, os sinais adquiridos não precisam ser processados e as análises para detecção da incrustação são feitas de forma direta, sem o uso de programas de computador, tornando este método mais simples.

A técnica apresentada neste capítulo propõe a utilização do teste com o impacto do martelo para detectar incrustação em tubulações. Com isso pretende-se avaliar as modificações nos sinais monitorados e verificar tais modificações quando o processo de incrustação ocorrer.

### 6.2 Técnica Proposta usando análise de vibrações

Nesta técnica, um detector de incrustação é baseado em um sistema de excitação, utilizando o teste do martelo para provocar vibrações mecânicas na tubulação sob teste, e em um sistema de detecção com um microfone ou um acelerômetro, para capturar a assinatura de ressonância da estrutura. Os tubos são fixados por suportes colocados nas extremidades dos mesmos.

Na Figura 6.1 apresenta-se um diagrama da topologia utilizada com esta técnica. Um sistema de excitação é utilizado para gerar as vibrações na tubulação e um sistema de detecção

para condicionamento do sinal é utilizado para capturar os parâmetros da vibração. Os sinais são analisados no domínio do tempo e da frequência, sendo medidos por um osciloscópio digital e por um analisador de espectro.

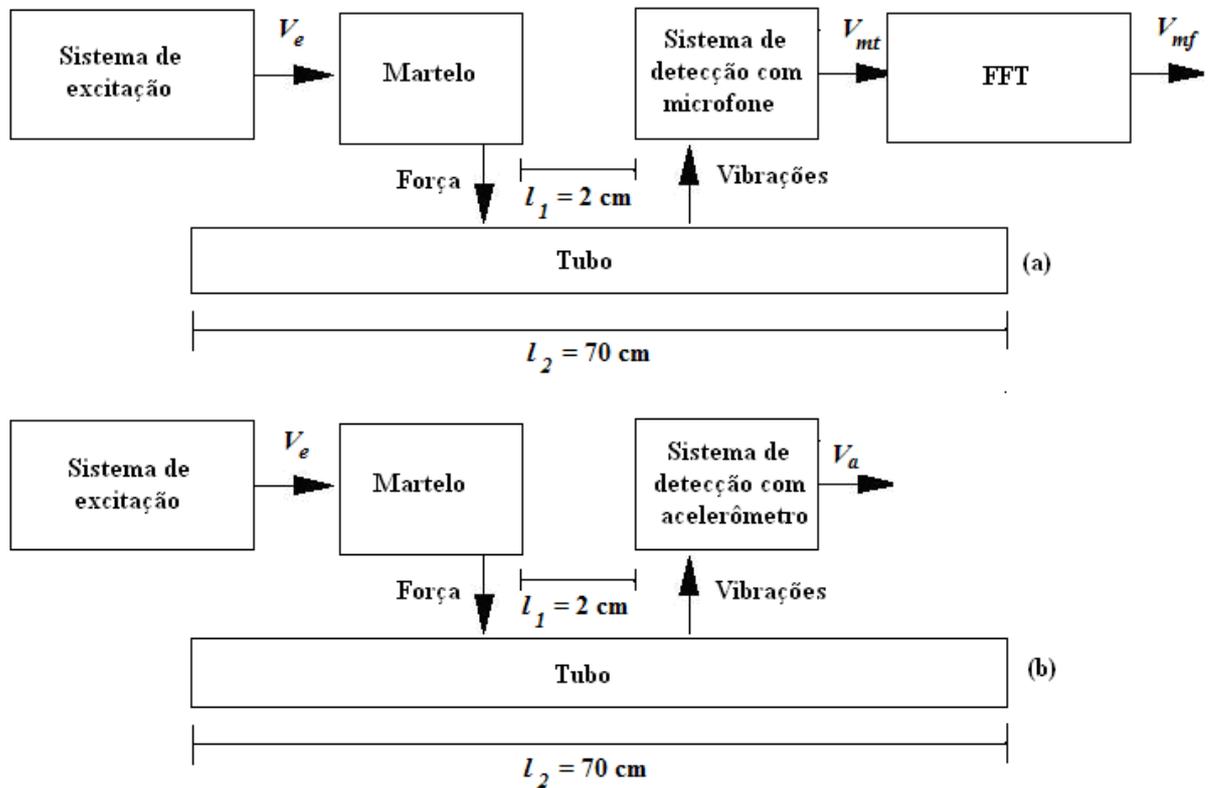


Figura 6.1: Diagrama da topologia utilizando o método de vibração.

Na Figura 6.2 apresenta-se o diagrama elétrico do circuito de excitação do martelo. Este circuito é formado por fonte CC e por um gerador de pulsos que excita uma bobina e aciona o martelo, fazendo o mesmo atingir a tubulação. O sinal de excitação do martelo está ilustrado na Figura 6.3. Este sinal é utilizado para controlar a frequência das batidas do martelo na tubulação. A força aplicada pelo martelo na tubulação é da ordem de 0,4 N, medida utilizando um dinamômetro digital.

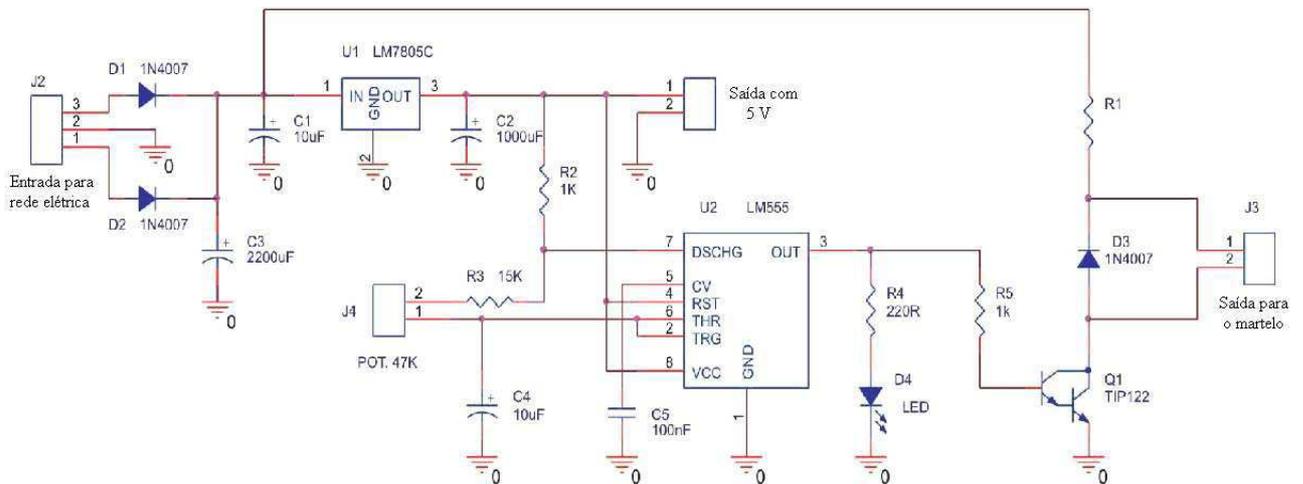


Figura 6.2: Diagrama elétrico do circuito de excitação do martelo.

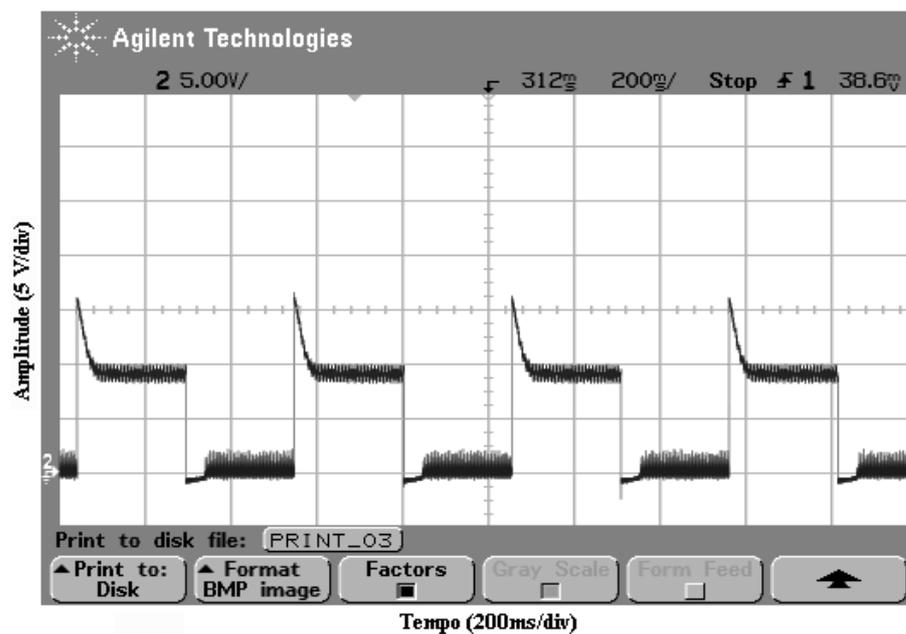


Figura 6.3: Forma de onda do sinal de excitação do martelo.

O sistema de detecção, utilizando um microfone tipo Cardioide GM 580 (Largura de banda: 50 Hz a 13 kHz), é composto por um amplificador diferencial para aumentar o sinal detectado e reduzir o nível de ruído nas medições. O circuito é um amplificador de tensão com frequência máxima de 2 MHz e ganho ajustável com valor máximo igual a 1000. O diagrama elétrico do circuito de detecção utilizando um microfone está apresentado na Figura 6.4.

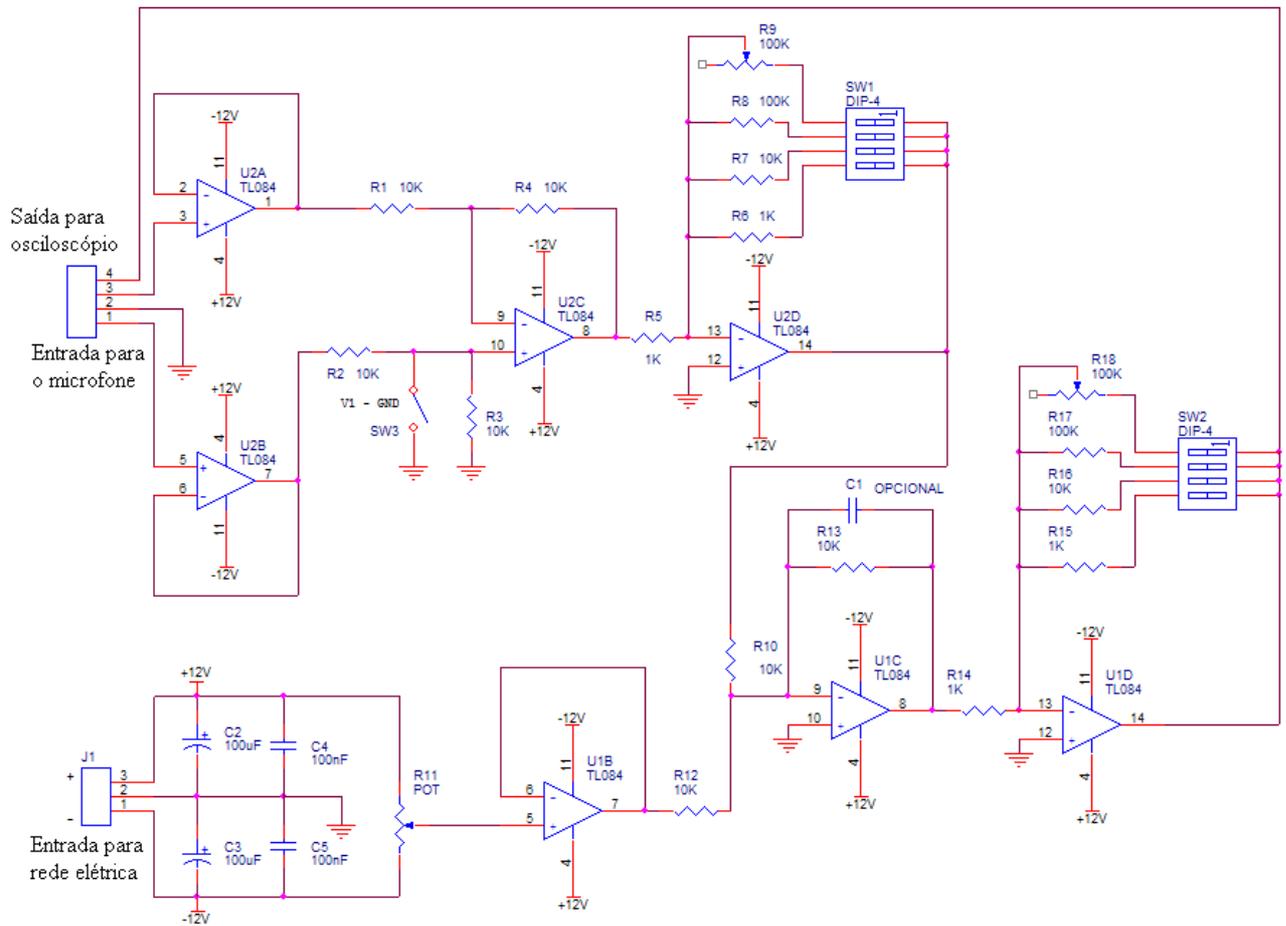


Figura 6.4: Diagrama elétrico do circuito de detecção utilizando um microfone.

O sistema de detecção, utilizando um acelerômetro, é composto por uma fonte CC, um amplificador de instrumentação e pelo acelerômetro ADXL202 [90]. O ADXL202 é um acelerômetro em um *chip*, biaxial, de baixa potência da Analog Device. Ele pode medir acelerações dinâmicas (vibrações) de até  $2g$  e aceleração estática (gravidade). Tem-se nas saídas (eixos  $x$  e  $y$ ) do acelerômetro um sinal digital cuja informação da aceleração é função do tempo de duração (*duty cycle*). As saídas podem ser lidas diretamente, não requerendo um conversor A/D. Uma tensão de saída analógica pode ser obtida utilizando um filtro RC para reconstruir o valor *dc* a partir do *duty cycle*. O diagrama elétrico do circuito de detecção utilizando um acelerômetro está apresentado na Figura 6.5.

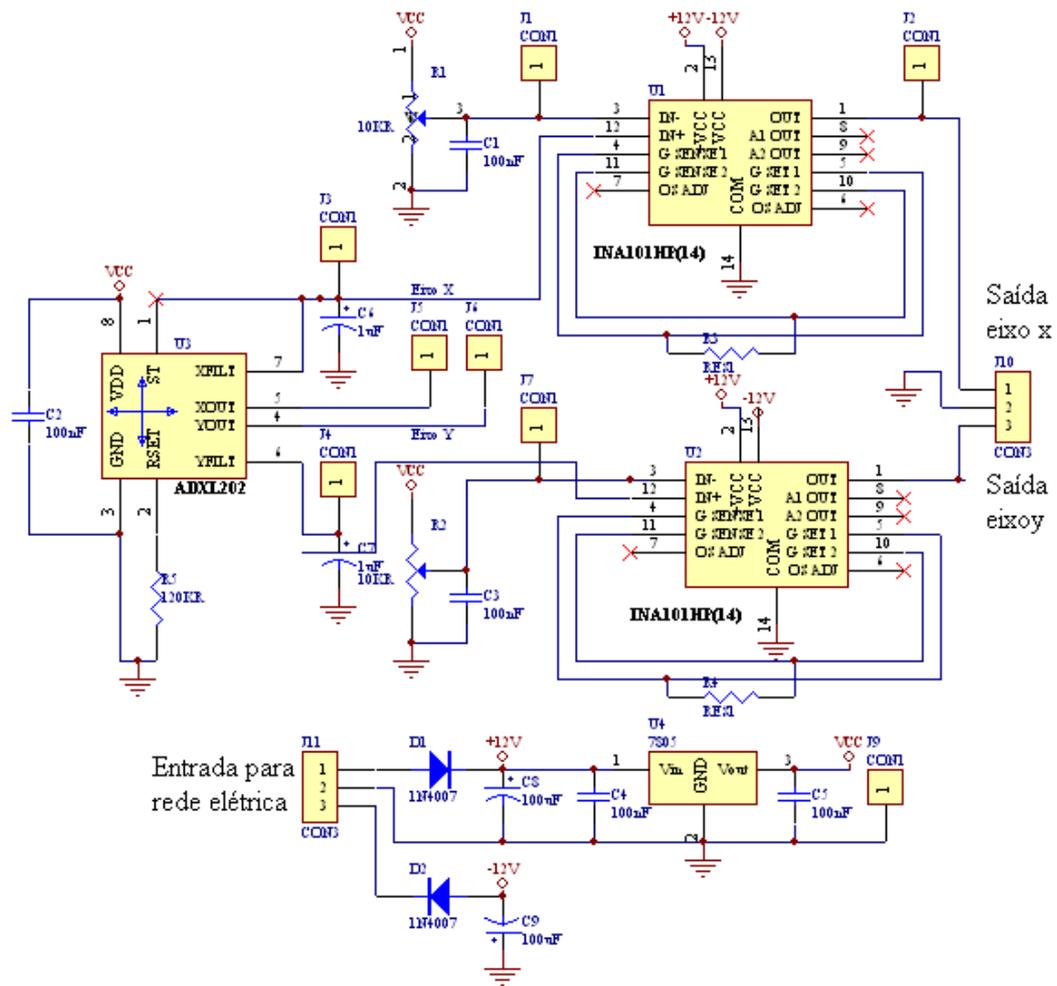


Figura 6.5: Diagrama elétrico do circuito de detecção utilizando um acelerômetro.

### 6.3 Resultados obtidos

Inicialmente foi realizada uma etapa de calibração para determinar a assinatura da tubulação, de forma que as medições são realizadas com a tubulação limpa, ou seja, sem incrustação. Os sinais recebidos são monitorados e as características (amplitude, frequência) são armazenados como valores de referência.

Os testes realizados com esta técnica segue o seguinte procedimento: inicialmente provoca-se a vibração na tubulação com o impacto do martelo; adquirem-se os sinais detectados pelo acelerômetro ou microfone; e com os dados adquiridos, observam-se as variações nos parâmetros e verifica-se a presença ou não da incrustação nas tubulações monitoradas.

Na Figura 6.6 apresenta-se a representação de uma vista transversal da tubulação sem incrustação (6.6a) e com incrustação (6.6b). As tubulações utilizadas possuem uma espessura de 2,5 mm e um diâmetro de 2,5 polegadas, sendo as mesmas de ferro galvanizado. A incrustação nos tubos é simulada colocando-se diferentes espessuras de resina (parafina) no interior dos mesmos.

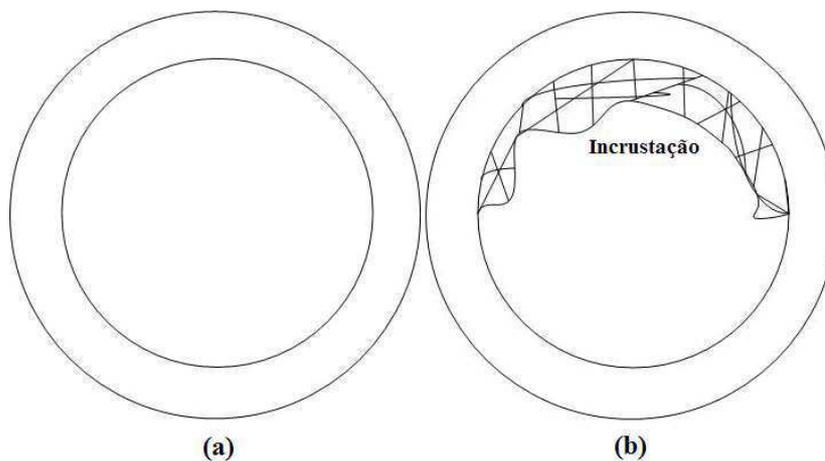


Figura 6.6: Representação de uma vista transversal da tubulação: (a) sem incrustação e (b) com incrustação.

Na Figura 6.7 apresenta-se uma fotografia da vista transversal das tubulações com 0 mm, 1 mm, 5 mm, 10 mm e 15 mm de resina respectivamente, utilizadas nos testes.



Figura 6.7: Fotografia da vista transversal das tubulações utilizadas.

Foram realizados testes utilizando o sistema de detecção com o microfone e com o acelerômetro. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

## 6.4 Resultados obtidos com o microfone

Na Figura 6.8 apresenta-se uma fotografia da montagem realizada com o teste do martelo utilizando o microfone. Nesta fotografia pode-se destacar o martelo (1) utilizado, assim como o microfone (2) e o analisador de espectro (3) com o sinal monitorado.



Figura 6.8: Fotografia da montagem utilizando o microfone.

Os sinais monitorados na saída do circuito com o microfone são armazenados por meio de um osciloscópio digital (Agilent modelo 54622A) e por um analisador de espectro (Agilent ESA-L modelo E4411B). Os sinais obtidos, para tubulação sem água (vazia), no domínio da frequência estão ilustrados nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 respectivamente. O sinal apresentado na Figura 6.9 representa a assinatura da tubulação, ou seja, o tubo sem incrustação; o sinal apresentado na Figura 6.10 representa um sinal referente ao experimento com 5 mm de incrustação (resina) e o sinal apresentado na Figura 6.11 representa um sinal referente ao experimento com 10 mm de incrustação (resina).

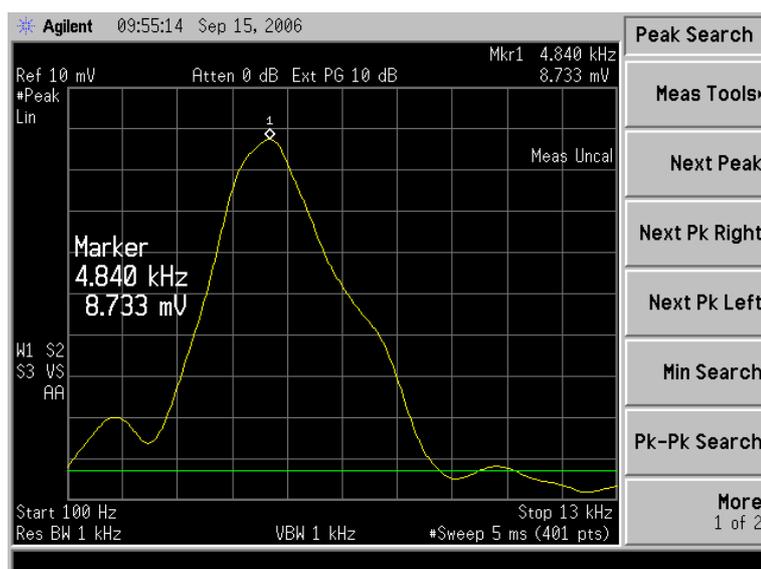


Figura 6.9: Representação do sinal de saída do microfone para o tubo sem incrustação.

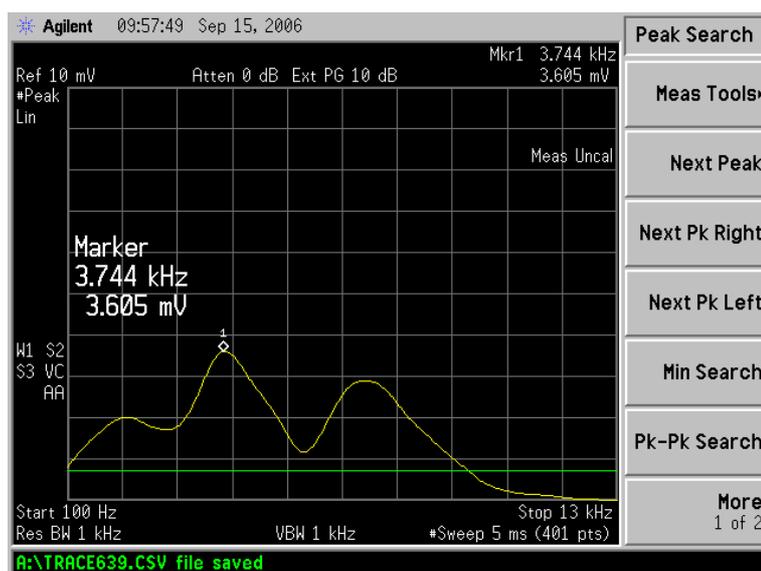


Figura 6.10: Representação do sinal de saída do microfone para o tubo com 5 mm incrustação.

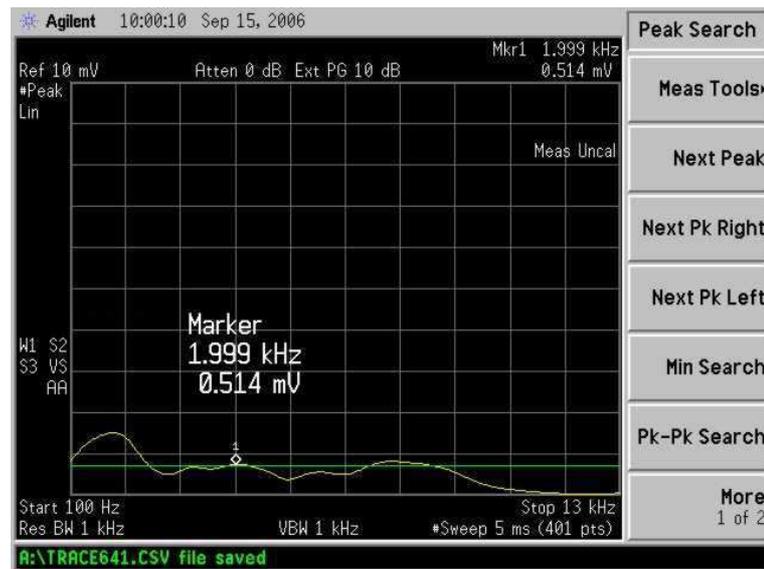


Figura 6.11: Representação do sinal de saída do microfone para o tubo com 10 *mm* incrustação.

Sinais associados no domínio do tempo, para tubulação sem água, estão ilustrados nas Figuras 6.12, 6.13 e 6.14 respectivamente. O sinal apresentado na Figura 6.12 representa a assinatura da tubulação, ou seja, o tubo sem incrustação; o sinal apresentado na Figura 6.13 representa um sinal referente ao experimento com 5 *mm* de incrustação (resina) e o sinal apresentado na Figura 6.14 representa um sinal referente ao experimento com 10 *mm* de incrustação (resina).

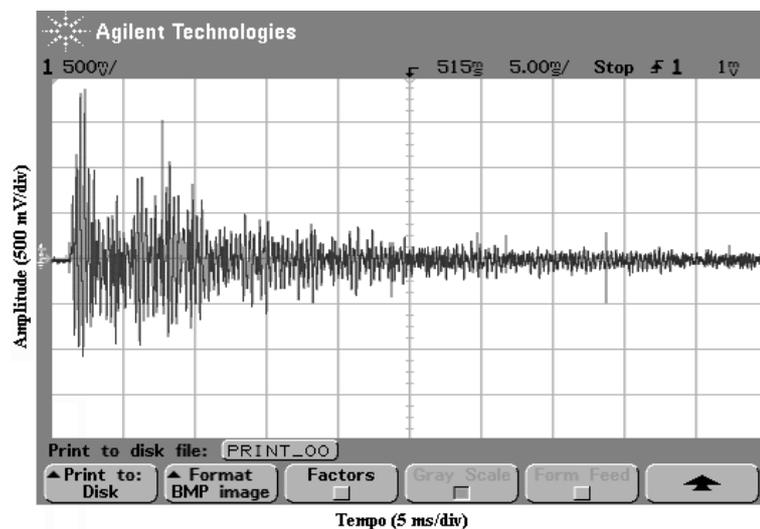


Figura 6.12: Forma de onda do sinal de saída do microfone, no domínio do tempo, para o tubo sem incrustação.

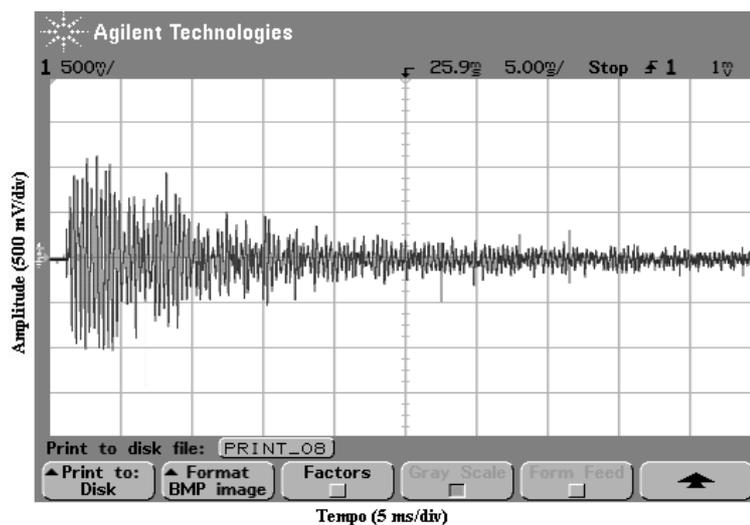


Figura 6.13: Forma de onda do sinal de saída do microfone, no domínio do tempo, para o tubo com 5 *mm* incrustação.

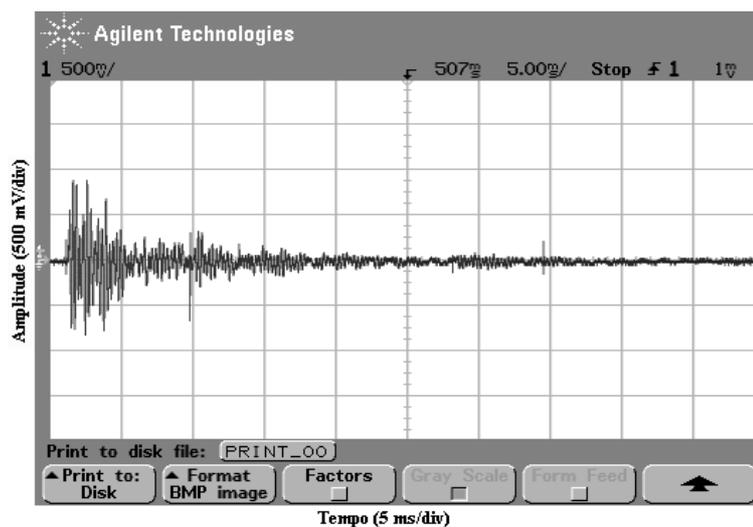


Figura 6.14: Forma de onda do sinal de saída do microfone, no domínio do tempo, para o tubo com 10 *mm* incrustação.

Em seguida foram realizados novos testes, agora com água no interior dos tubos. Nas Figuras 6.15 e 6.16 estão apresentados os resultados obtidos no domínio da frequência para para tubulação sem incrustação e com 5 *mm* de incrustação, respectivamente.



Figura 6.15: Representação do sinal de saída do microfone, no domínio da frequência, para o tubo sem incrustação (com água).

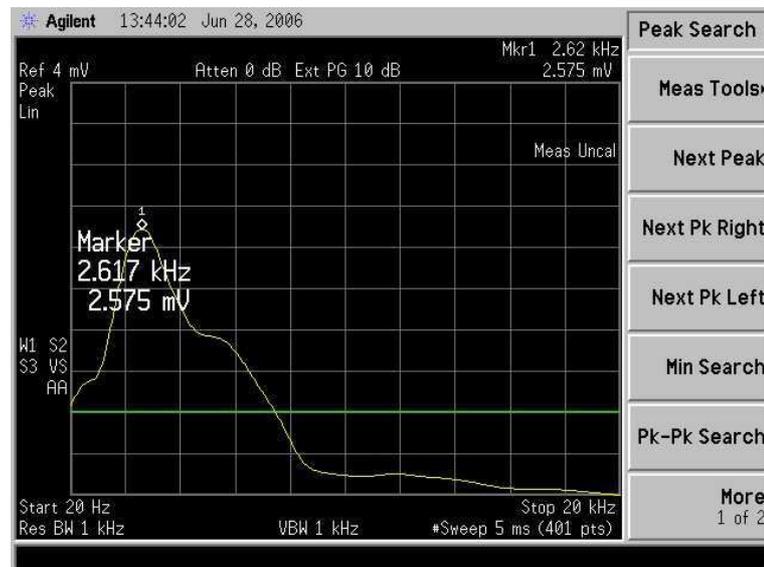


Figura 6.16: Representação do sinal de saída do microfone, no domínio da frequência, para o tubo com 5 mm incrustação (com água).

Nas Figuras 6.17 e 6.18 estão apresentados os resultados obtidos (tubos com água) no domínio do tempo para para tubulação sem incrustação e com 5 mm de incrustação, respectivamente.

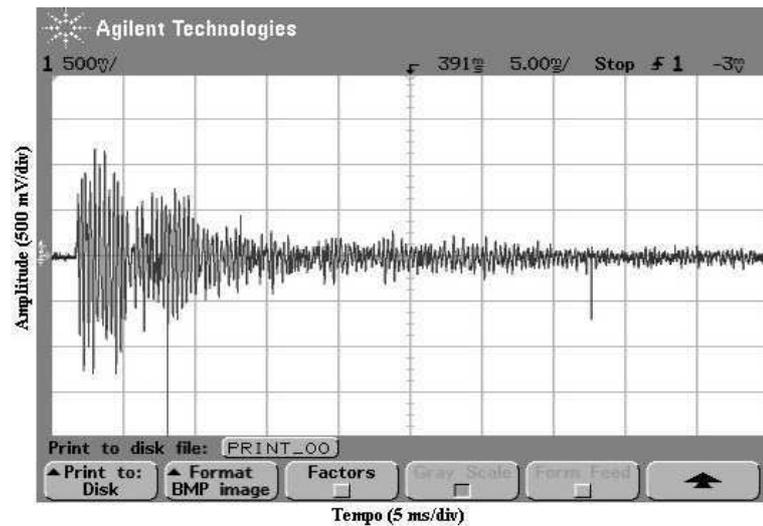


Figura 6.17: Forma de onda do sinal de saída do microfone, no domínio do tempo, para o tubo sem incrustação (com água).

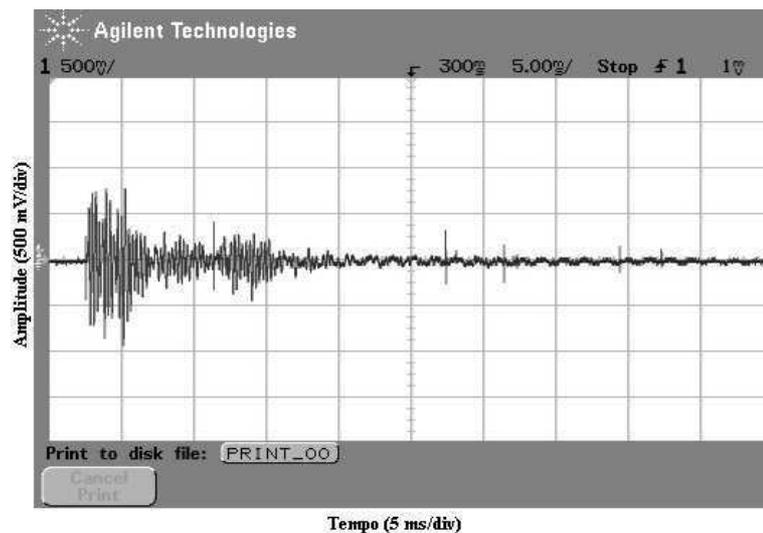


Figura 6.18: Forma de onda do sinal de saída do microfone, no domínio do tempo, para o tubo com 5 mm incrustação (com água).

Observa-se que as amplitudes e frequências dos sinais obtidos, para os tubos com água, são menores em relação aos resultados obtidos para os tubos sem água, devido ao aumento da massa, que provoca reduções nas vibrações. Mas mesmo assim, o aumento da incrustação ainda pode ser detectado, analisando as reduções nos parâmetros, tomando como referência a tubulação sem incrustação.

Analisando os resultados, observa-se que modificações na frequência e amplitude, fornecem informações importantes sobre a incrustação presente nas tubulações, ou seja, as reduções de amplitude nos sinais e os deslocamentos de frequência em relação aos valores obtidos com a tubulação limpa, são os indicativos da presença e aumento da incrustação nas tubulações monitoradas. As distorções nos sinais ocorrem devido as camadas de incrustação no interior dos tubos, que modificam o meio de propagação [11], [91]. Todas as tubulações utilizadas apresentam as mesmas características (material, espessura, diâmetro e comprimento). Assim, o método apresentado fornece resultados confiáveis, sendo representativo para detecção da incrustação de forma simples e direta.

## 6.5 Resultados obtidos com o acelerômetro

Na Figura 6.19 apresenta-se uma fotografia da montagem realizada com o teste do martelo utilizando o acelerômetro. Nesta fotografia pode-se destacar o martelo (1) utilizado, assim como o acelerômetro (2) e o osciloscópio digital (3) com o sinal monitorado.

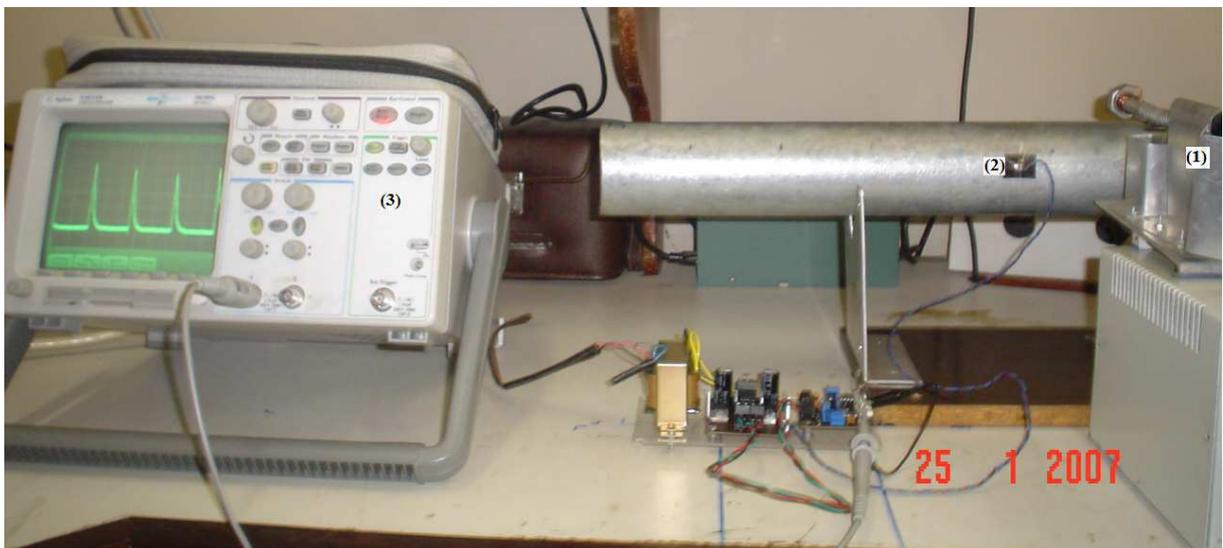


Figura 6.19: Fotografia da montagem utilizando o acelerômetro.

Os sinais monitorados na saída do circuito com o acelerômetro são armazenados por meio de um osciloscópio digital. Os sinais obtidos, para tubulação sem água, estão ilustrados nas Figuras 6.20, 6.21 e 6.22 respectivamente. Nestas figuras, os sinais na parte superior são obtidos na saída do circuito do acelerômetro, e os sinais na parte inferior são obtidos na saída

do circuito que excita o martelo. O sinal apresentado na Figura 6.20 representa a assinatura da tubulação, ou seja, o tubo sem incrustação; o sinal apresentado na Figura 6.21 representa um sinal referente ao experimento com 5 mm de incrustação (resina) e o sinal apresentado na Figura 6.22 representa um sinal referente ao experimento com 10 mm de incrustação (resina). Podemos observar que não existem diferenças no tempo de excitação e detecção pelo acelerômetro em todas as medições. O valor medido é de 64 ms, como ilustrado nas figuras, ressaltando que estes resultados foram obtidos para tubulações com 70 cm de comprimento.

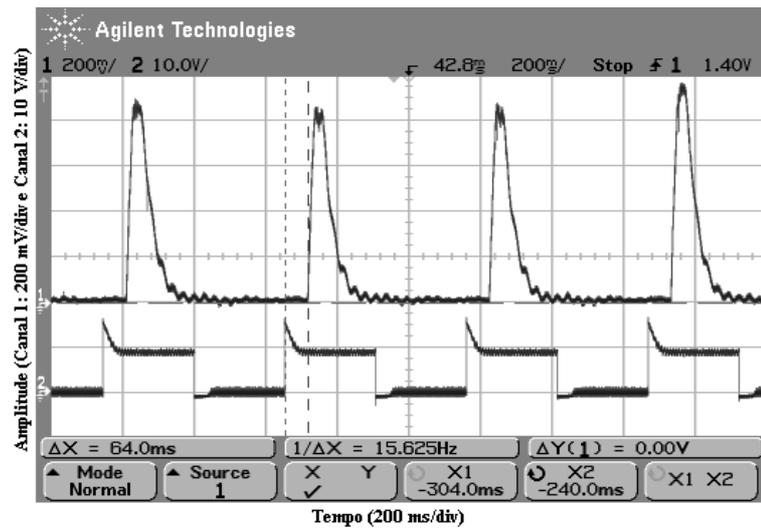


Figura 6.20: Forma de onda do sinal de saída do acelerômetro sem incrustação.

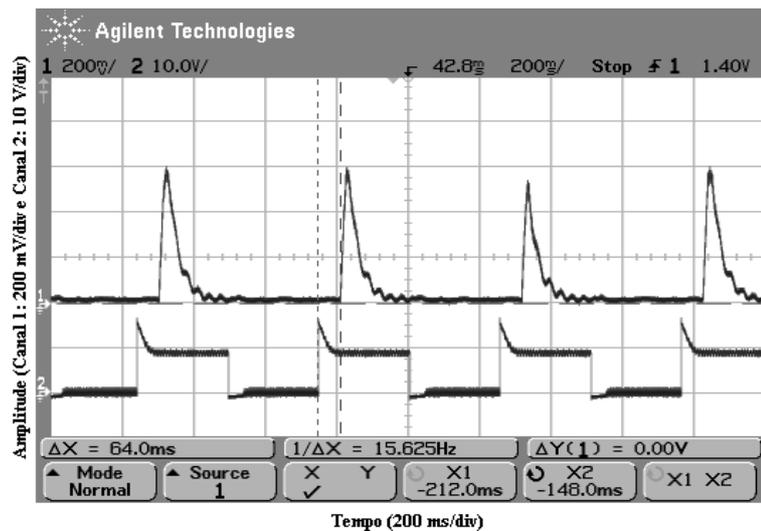


Figura 6.21: Forma de onda do sinal de saída do acelerômetro com 5 mm incrustação.

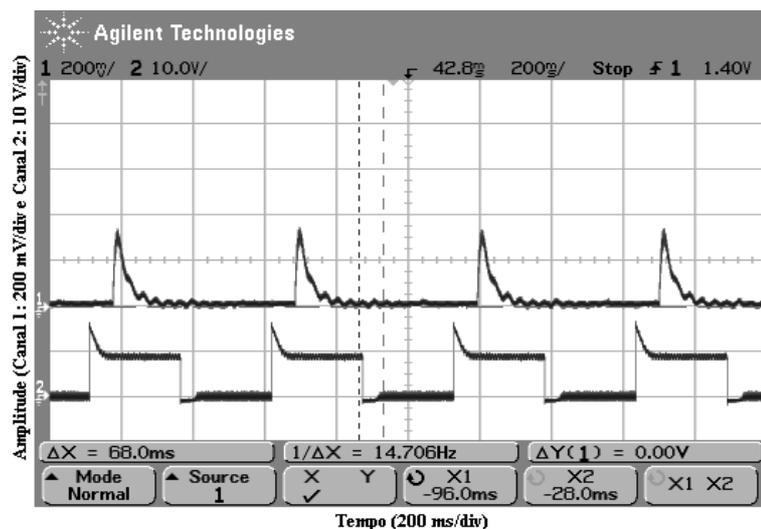


Figura 6.22: Forma de onda do sinal de saída do acelerômetro com 10 mm incrustação.

Em seguida foram realizados novos testes, agora com água no interior da tubulação. Nas Figuras 6.23 e 6.24 estão apresentados os resultados obtidos para tubulação sem incrustação e com 5 mm de incrustação, respectivamente.

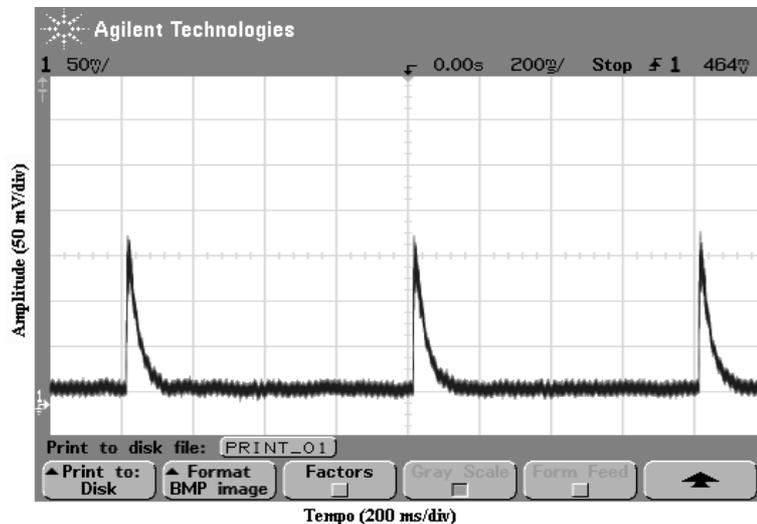


Figura 6.23: Forma de onda do sinal de saída do acelerômetro para o tubo sem incrustação (com água).

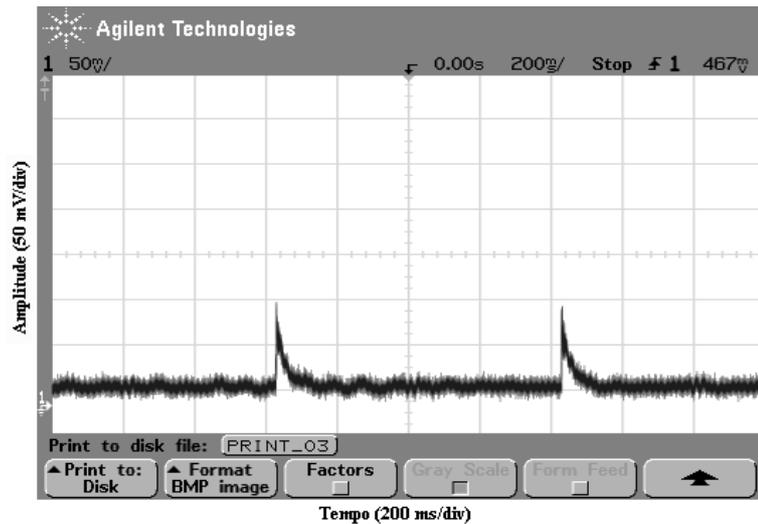


Figura 6.24: Forma de onda do sinal de saída do acelerômetro para o tubo com 5 mm incrustação (com água).

Mais uma vez, observa-se que os valores de amplitude dos sinais, para tubulação com água, são menores que os valores obtidos para a tubulação sem água, devido ao aumento de massa, que provoca uma redução natural das vibrações na tubulação. Mas, o aumento da incrustação ainda pode ser detectado observando as novas reduções de amplitude.

Analisando as reduções nas amplitudes dos sinais monitorados com o acelerômetro, a incrustação pode ser detectada, uma vez que os valores obtidos com a assinatura da tubulação (tubulação limpa) são tomados como referência e as reduções nos valores são atribuídas a incrustação (aumento na espessura da resina), que pode ser observada no interior das tubulações sob testes.

### 6.5.1 Resultados obtidos com a análise de elementos finitos

O uso de elementos finitos, mostra que o impacto do martelo sobre a superfície de um tubo causa uma onda de deformação elástica, que se propaga com baixa velocidade. Um acelerômetro, firmemente preso sobre a superfície perto do ponto de impacto, pode ser usado para monitoramento. Devido ao amortecimento interno, a vibração se atenua rapidamente. O desenvolvimento temporal e o decaimento da vibração livre dependem das características físicas da geometria do tubo, especialmente do coeficiente de amortecimento que é determinado pelas espessuras da parede do tubo [91-92].

Simulações utilizando o software FEMLAB, para análise de elementos finitos, foram realizadas para auxiliar nos resultados experimentais obtidos com o acelerômetro. Os testes foram implementados com simulações que usam as mesmas dimensões e características dos tubos reais usados nos testes experimentais e com as mesmas densidades e características da resina (parafina). Os resultados da simulação, usando o impacto do martelo para o tubo limpo, com 5 mm e 15 mm de incrustação estão apresentados nas Figuras 6.25, 6.26 e 6.27, respectivamente. Observa-se que o sinal (resultado dos deslocamentos mecânicos) se propaga na nova interface (resina), dentro do tubo, de acordo com as curvas de contorno apresentadas.

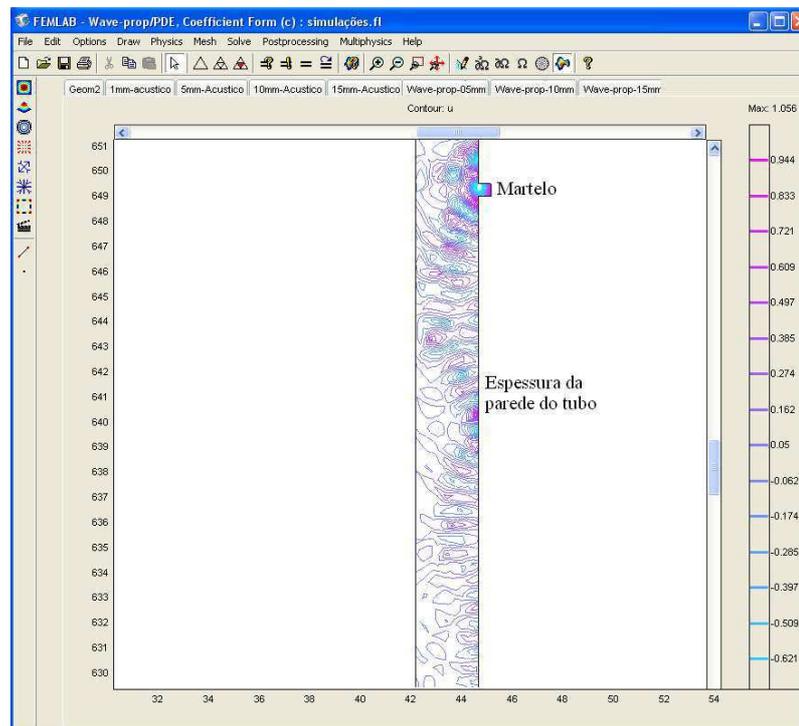


Figura 6.25: Curvas de contorno da simulação para o tubo sem incrustação.

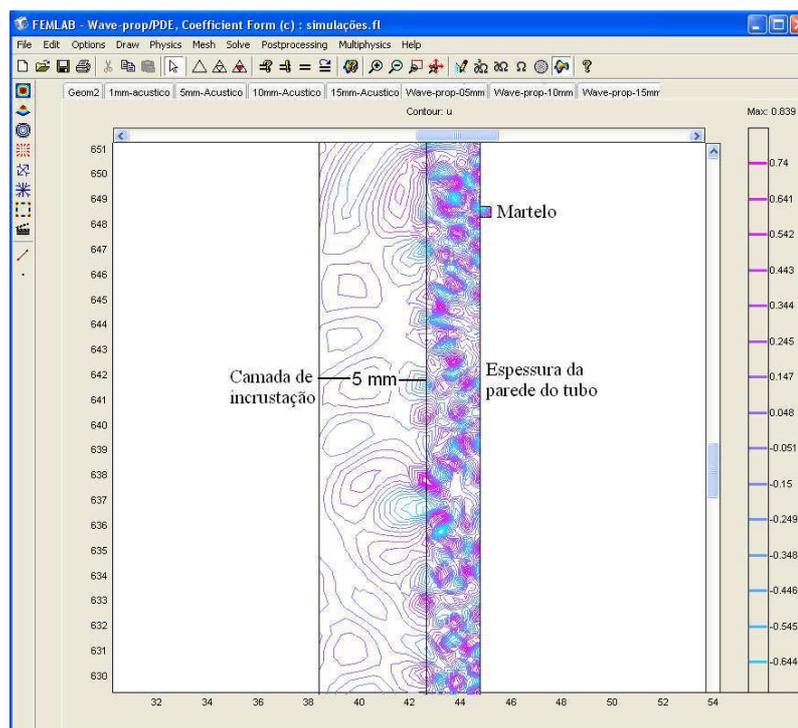


Figura 6.26: Curvas de contorno da simulação para o tubo com 5 mm de incrustação.

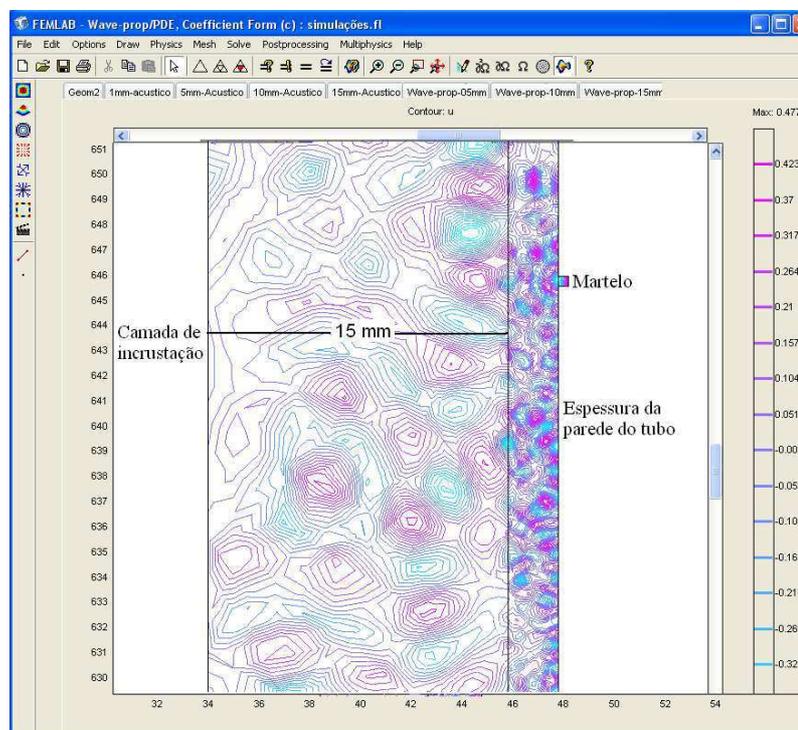


Figura 6.27: Curvas de contorno da simulação para o tubo com 15 mm de incrustação.

Pode-se observar que os deslocamentos mecânicos (deformações) começam próximo ao impacto do martelo e se propagam pelo tubo, em direção ao acelerômetro, como apresentado nas Figuras 6.28, 6.29 e 6.30, para o tubo limpo, com 5 mm e 15 mm de incrustação, respectivamente. É observado que o aumento da camada de incrustação provoca uma redução na amplitude dos deslocamentos, semelhante a redução da amplitude do sinal monitorado com os testes experimentais realizados com o acelerômetro.

Com as simulações foi possível observar que a onda mecânica, produzida pelo impacto, se propaga pela parede do tubo e também pela nova interface criada com a incrustação (resina), colocada no interior do tubo. Observa-se também a redução na amplitude do sinal propagado, devido ao aumento da incrustação, que provoca o aumento da massa da estrutura, reduzindo assim a intensidade das vibrações. Esta análise comprova o comportamento observado com a redução da amplitude nos testes com o acelerômetro.

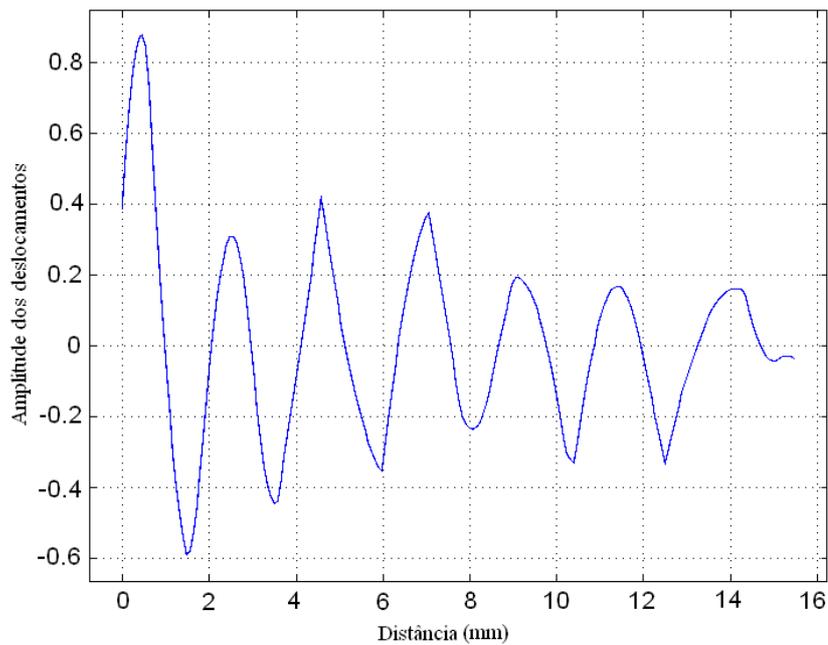


Figura 6.28: Gráfico dos deslocamentos para o tubo sem incrustação.

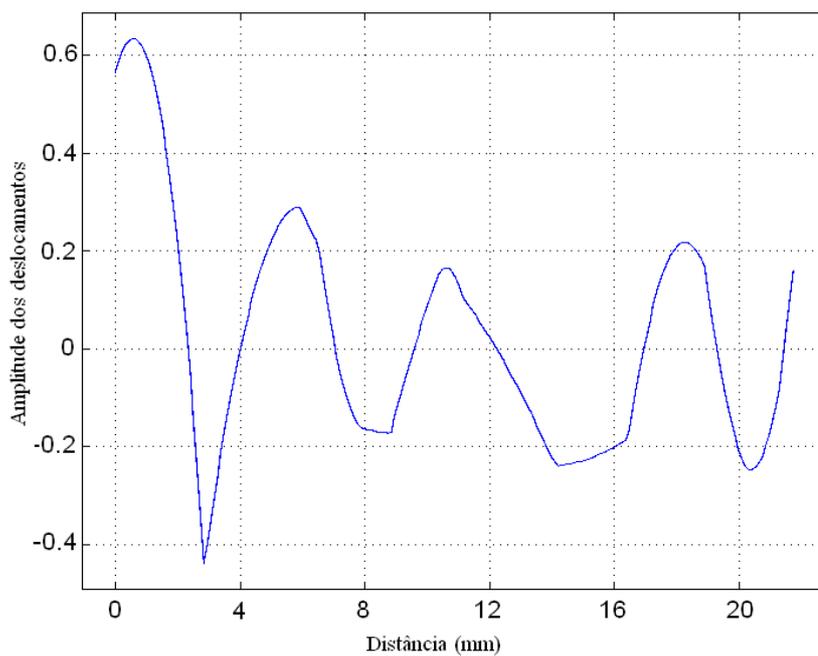


Figura 6.29: Gráfico dos deslocamentos para o tubo com 5 mm de incrustação.

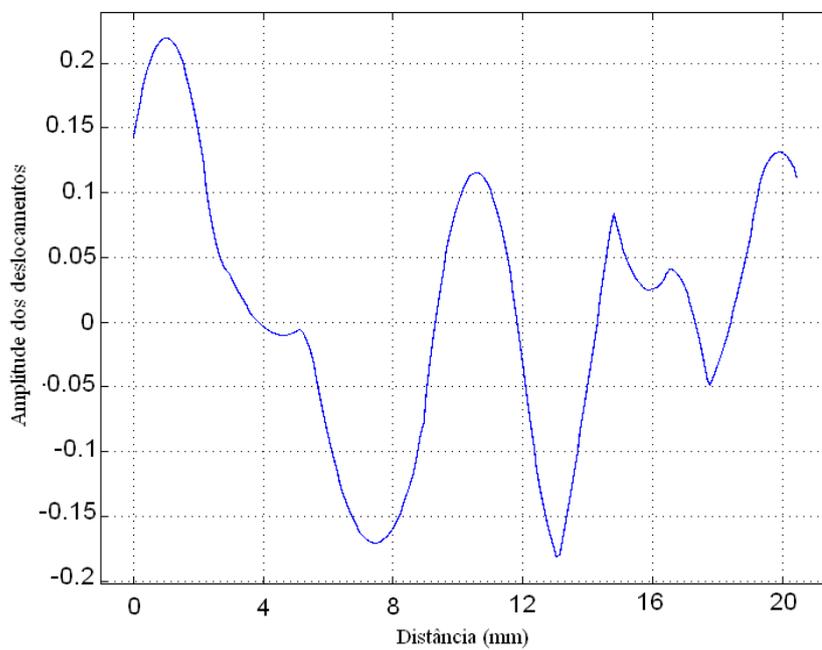


Figura 6.30: Gráfico dos deslocamentos para o tubo com 15 mm de incrustação.

## 6.6 Testes com diferentes camadas

Foram realizados testes com diferentes camadas de incrustação (resina), no interior de um mesmo tubo. Na Figura 6.31 apresenta-se uma representação do tubo com três níveis de incrustação (resina): 0 *mm*, 5 *mm* e 10 *mm*.

O tubo utilizado nos testes possui 60 *cm* de comprimento e 2,5 *mm* de espessura, semelhante aos demais tubos utilizados. Foram realizadas medições com distâncias, entre o impacto do martelo e o acelerômetro e microfone, de 3 *cm* ao longo do tubo. O martelo é fixado na extremidade do tubo, onde não tem incrustação, sendo o microfone e o acelerômetro deslocados ao longo do tubo.

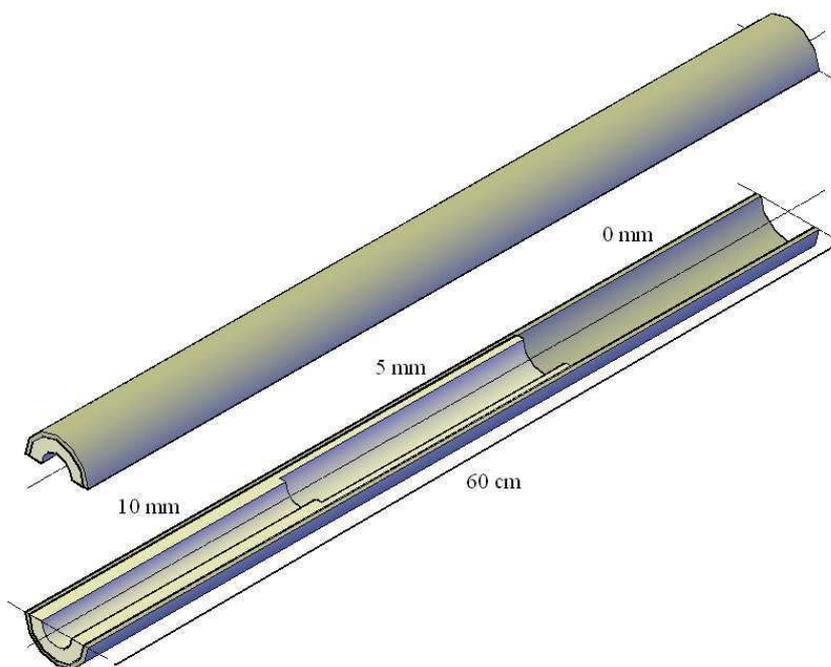


Figura 6.31: Representação do tubo com três níveis de incrustação.

Os resultados obtidos com o microfone estão apresentados na Tabela 6.1 e na Figura 6.32.

Tabela 6.1: Resultados obtidos com o microfone para diferentes camadas.

Distância (cm)	Frequencia (kHz)	Espessura (mm)
3	4,67	0
6	4,52	0
9	4,47	0
12	4,47	0
15	4,47	0
18	4,42	0
21	3,42	5
24	3,39	5
27	3,32	5
30	3,27	5
33	3,27	5
36	3,27	5
39	3,24	5
42	1,87	10
45	1,82	10
48	1,72	10
51	1,62	10
54	1,62	10
57	1,62	10

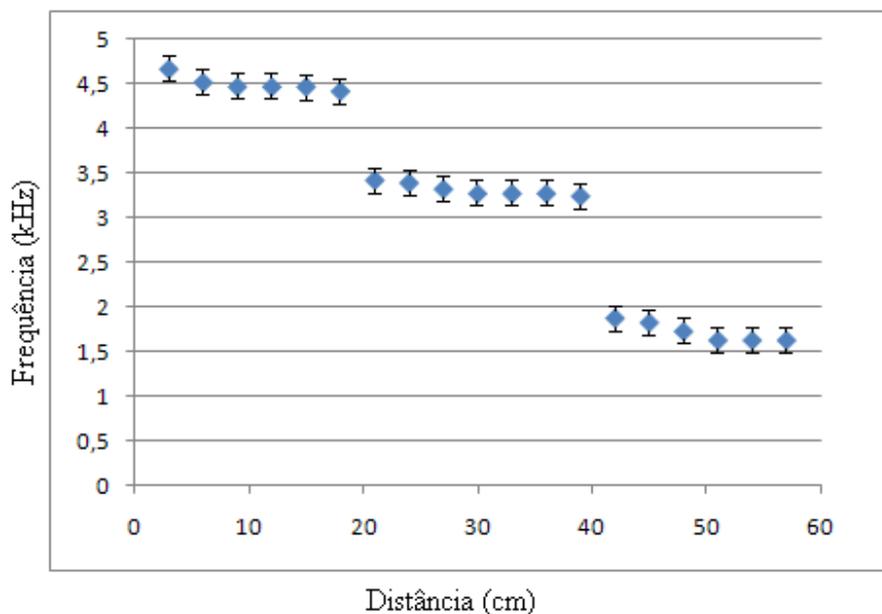


Figura 6.32: Gráfico dos resultados com o microfone para três níveis de incrustação.

O desvio em relação aos valores das frequências para cada ponto no gráfico é igual a 4,5%.

Com o aumento da incrustação, há uma redução nos valores das frequências, nos testes realizados com o microfone. Observa-se também os diferentes níveis de sinais ao longo do tubo, que possibilitam distinguir as camadas no interior do tubo, ou seja, tubo limpo até 20 *cm* (frequência em torno de 4,5 kHz), tubo com 5 *mm* de incrustação entre 20 e 40 *cm* (frequência em torno de 3,3 kHz) e uma camada de 10 *mm* de incrustação (resina) entre 40 e 60 *cm* (frequência em torno de 1,7 kHz). Desta forma pode-se detectar diferentes camadas de incrustação na mesma tubulação.

Os resultados obtidos com o acelerômetro estão apresentados na Tabela 6.2 e na Figura 6.33.

Tabela 6.2: Resultados obtidos com o acelerômetro para diferentes camadas.

<b>Distância (cm)</b>	<b>Amplitude (V)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
3	0,898	0
6	0,894	0
9	0,894	0
12	0,894	0
15	0,894	0
18	0,886	0
21	0,628	5
24	0,608	5
27	0,588	5
30	0,588	5
33	0,588	5
36	0,588	5
39	0,586	5
42	0,357	10
45	0,325	10
48	0,325	10
51	0,325	10
54	0,325	10
57	0,325	10

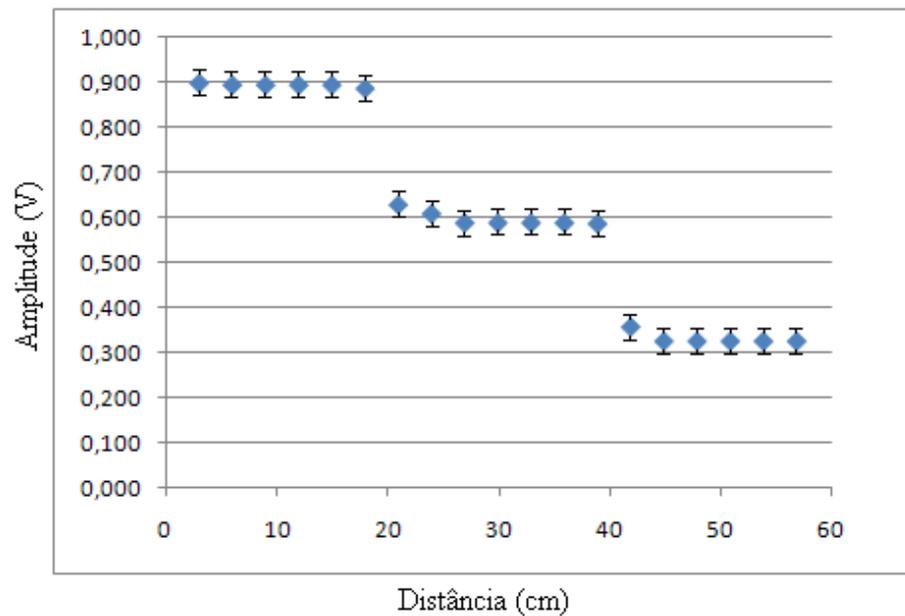


Figura 6.33: Gráfico dos resultados com o acelerômetro para três níveis de incrustação.

O desvio em relação aos valores das amplitudes para cada ponto no gráfico é igual a 3,0%.

Com o aumento da incrustação, há uma redução nas amplitudes, nos testes realizados com o acelerômetro. Observa-se também os diferentes níveis de sinais ao longo do tubo, que possibilitam distinguir as camadas no interior do tubo, ou seja, tubo limpo até 20 *cm* (amplitude em torno de 0,9 V), tubo com 5 *mm* de incrustação entre 20 e 40 *cm* (amplitude em torno de 0,6 V) e uma camada de 10 *mm* de incrustação (resina) entre 40 e 60 *cm* (amplitude em torno de 0,3 V). Mais uma vez pode-se detectar diferentes camadas de incrustação na mesma tubulação.

## 6.7 Metodologia de análise dos testes

A metodologia utilizada consiste na observação da variação de alguns parâmetros, como amplitude e frequência, nos sinais monitorados utilizando o sistema de detecção com o acelerômetro e com o microfone.

### 6.7.1 Testes com o acelerômetro

O sinal de saída utilizando o acelerômetro pode ser modelado a partir da representação apresentada na Figura 6.34.

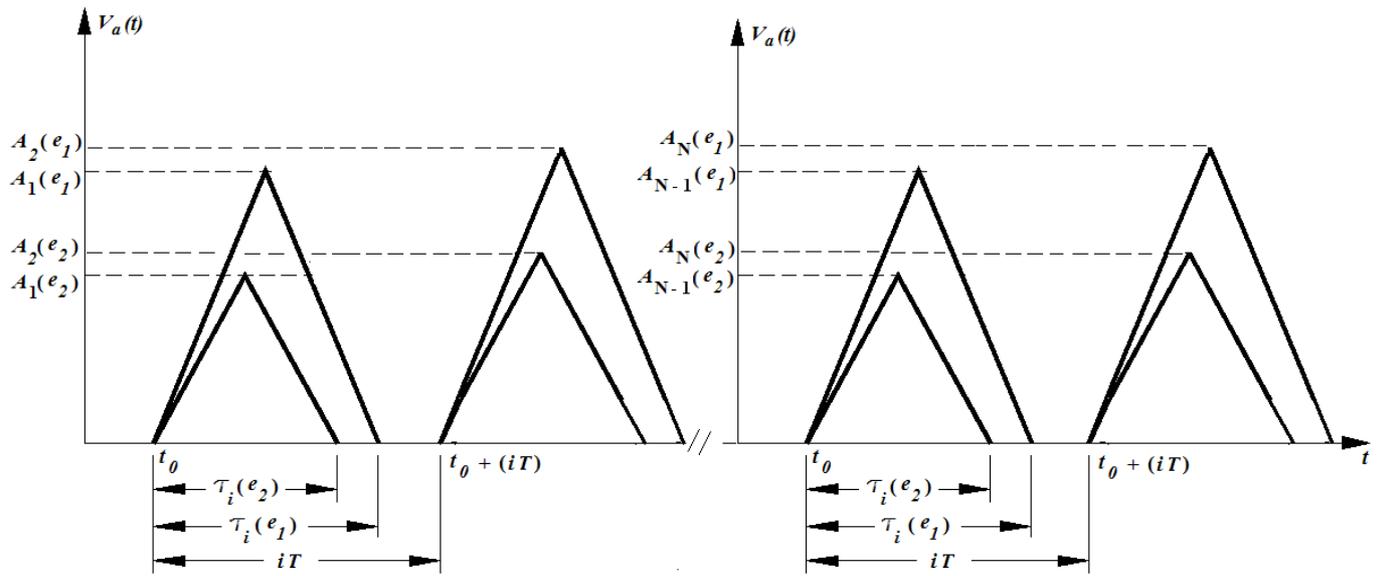


Figura 6.34: Representação do sinal na saída do acelerômetro.

Desta forma podemos definir a seguinte expressão:

$$A_i = \max(V_a(t)), i = 1, 2, \dots, N, t \in [t_0, t_0 + iT] \quad (6.1)$$

onde:  $e_i$  é a espessura da incrustação ( $e_2 > e_1$ ),  $V_a(t)$  é o sinal de saída do sistema de detecção utilizando o acelerômetro e  $A_i$  é a amplitude máxima do sinal  $V_a(t)$ .

O valor médio ( $A$ ) para as amplitudes máximas do sinal  $V_a(t)$  é dado por:

$$A(e) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i(e) \quad (6.2)$$

onde:  $N$  é o número de medições realizadas em cada experimento.

O aumento na espessura da incrustação ( $e$ ) provoca uma redução no valor máximo da amplitude no sinal de saída ( $A_i$ ) e também uma redução no tempo de duração do sinal ( $\tau_i$ ), nos testes realizados com o acelerômetro.

### 6.7.2 Testes com o microfone no domínio do tempo

O sinal de saída utilizando o microfone, no domínio do tempo, pode ser modelado a partir da representação apresentada na Figura 6.35.

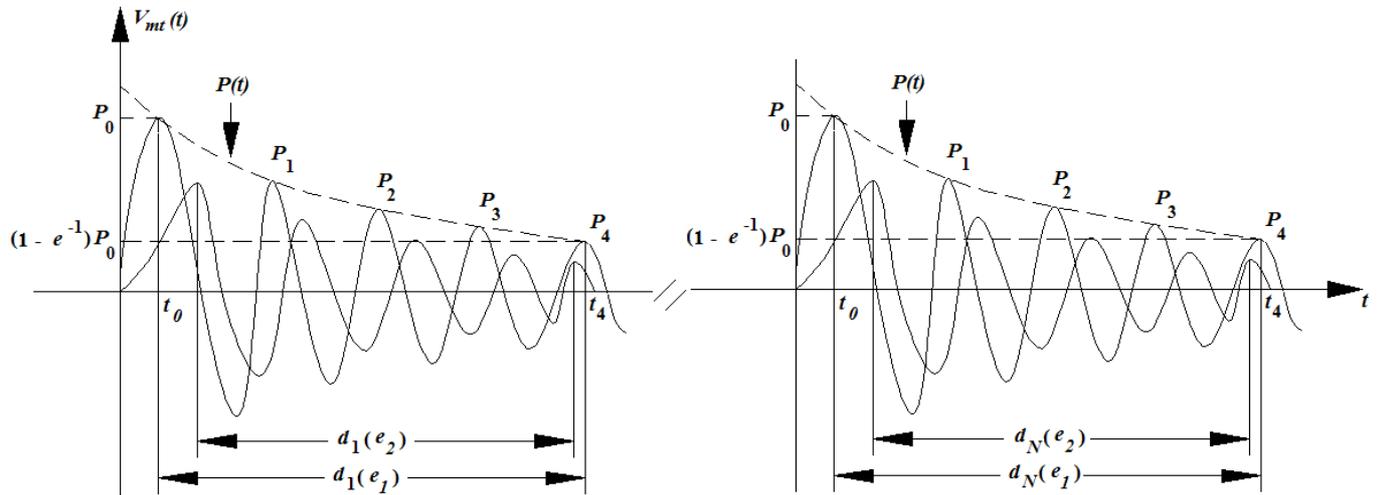


Figura 6.35: Representação do sinal na saída do microfone, no domínio do tempo.

Desta forma podemos definir a seguinte expressão:

$$P(t) = P_0(1 - e^{-\frac{t}{d_i(e)}}) \quad (6.3)$$

onde:  $e_i$  é a espessura da incrustação ( $e_2 > e_1$ ),  $V_{mt}(t)$  é o sinal de saída do sistema de detecção utilizando o microfone, no domínio do tempo,  $P(t)$  é o envelope do sinal e  $d_i$  é o tempo de decaimento do sinal  $V_{mt}(t)$ , ou seja, o tempo necessário para reduzir a amplitude máxima ( $P_0$ ) do sinal  $V_{mt}(t)$  para 37% do seu valor  $((1 - e^{-1})P_0)$ .

O valor médio ( $D$ ) para os tempos de decaimento do sinal  $V_{mt}(t)$  é dado por:

$$D(e) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i(e) \quad (6.4)$$

onde:  $N$  é o número de medições realizadas em cada experimento.

O aumento na espessura da incrustação ( $e$ ) provoca uma redução no valor do tempo de decaimento ( $d_i$ ) do sinal  $V_{mt}(t)$  e também uma redução na amplitude máxima ( $P_0$ ) deste sinal, para os testes realizados com o microfone, no domínio do tempo.

### 6.7.3 Testes com o microfone no domínio da frequência

O sinal de saída utilizando o microfone, no domínio da frequência, pode ser modelado a partir da representação apresentada na Figura 6.36.

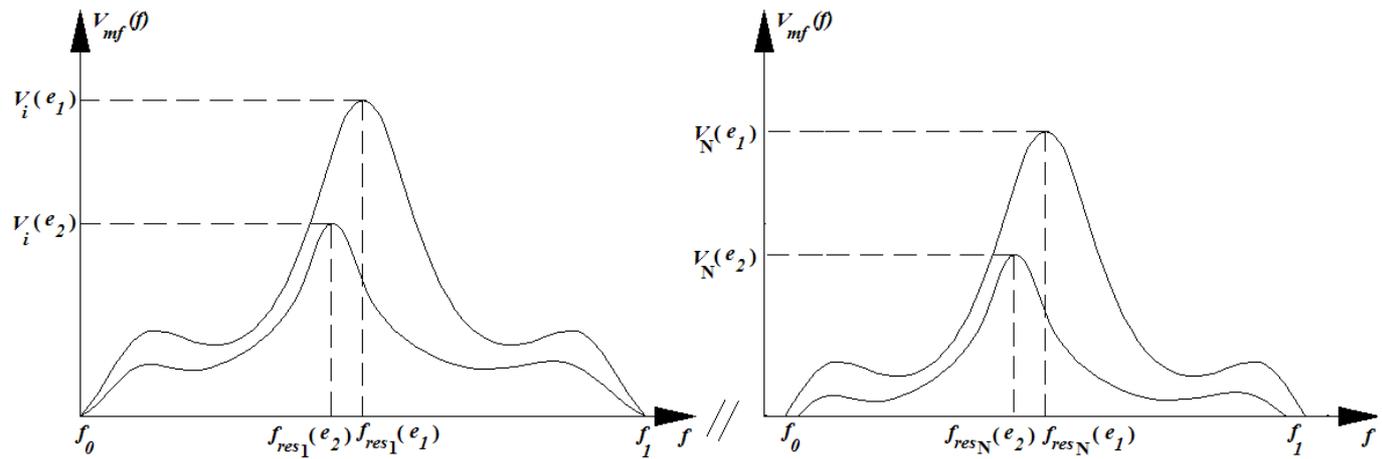


Figura 6.36: Representação do sinal na saída do microfone, no domínio da frequência.

Desta forma podemos definir a seguinte expressão:

$$f_{resi} = \operatorname{argmax}(V_{mf}(f)), f \in [f_0, f_1] \quad (6.5)$$

onde:  $e_i$  é a espessura da incrustação ( $e_2 > e_1$ ),  $V_{mf}(f)$  é o sinal de saída do sistema de detecção utilizando o microfone, no domínio da frequência, e  $f_{resi}$  é a frequência de ressonância do sinal  $V_{mf}(f)$ , ou seja, a frequência ( $f$ ) onde ocorre o valor máximo ( $V_i$ ) do sinal  $V_{mf}(f)$ .

O valor médio ( $F$ ) para as frequências de ressonância do sinal  $V_{mf}(f)$  é dado por:

$$F(e) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{resi}(e) \quad (6.6)$$

onde:  $N$  é o número de medições realizadas em cada experimento.

O aumento na espessura da incrustação ( $e$ ) provoca uma redução no valor da frequência de ressonância ( $f_{resi}$ ) do sinal  $V_{mf}(f)$  e também uma redução na amplitude máxima ( $V_i$ ) deste sinal, para os testes realizados com o microfone, no domínio da frequência.

## 6.8 Critério de sensibilidade para terceira técnica proposta

Uma avaliação das técnicas utilizadas pode ser realizada através de critérios de sensibilidade  $S_i(\cdot)$ , definido como a variação do sinal de saída ( $\Delta$ ) com a variação da espessura de incrustação ( $\Delta e$ ) (sensibilidade relativa) [91-92]. Neste caso, determina-se a variação de cada parâmetro (amplitude, tempo de decaimento e frequência) em relação ao aumento da espessura de incrustação.

O critério de sensibilidade relativa para os respectivos sinais de saída são definidos como:

$$S_i(A) = \frac{\Delta A}{\Delta e} \quad (6.7)$$

onde:  $\Delta A$  é a variação de  $A$  e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

$$S_i(D) = \frac{\Delta D}{\Delta e} \quad (6.8)$$

onde:  $\Delta D$  é a variação de  $D$  e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

$$S_i(F) = \frac{\Delta F}{\Delta e} \quad (6.9)$$

onde:  $\Delta F$  é a variação de  $F$  e  $\Delta e$  é a variação da espessura de incrustação.

Pode-se definir também a sensibilidade normalizada  $S_N$ , em relação aos parâmetros de referência, ou seja, dividindo a sensibilidade relativa pelos parâmetros obtidos com a tubulação sem incrustação.

Os critérios de sensibilidade normalizada para cada parâmetro em relação ao aumento da espessura de incrustação podem ser definidos como:

$$S_N(A) = \frac{\frac{\Delta A}{\Delta e}}{A_0} \quad (6.10)$$

onde:  $A_0$  é o valor de  $A$  para tubulação sem incrustação.

$$S_N(D) = \frac{\frac{\Delta D}{\Delta e}}{D_0} \quad (6.11)$$

onde:  $D_0$  é o valor de  $D$  para tubulação sem incrustação.

$$S_N(F) = \frac{\frac{\Delta F}{\Delta e}}{F_0} \quad (6.12)$$

onde:  $F_0$  é o valor de  $F$  para tubulação sem incrustação.

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 6.37. O desvio em relação aos valores dos parâmetros  $A$ ,  $D$  e  $F$  para cada ponto nos gráficos é igual a 3,5%, 4,3% e 5,2%, respectivamente.

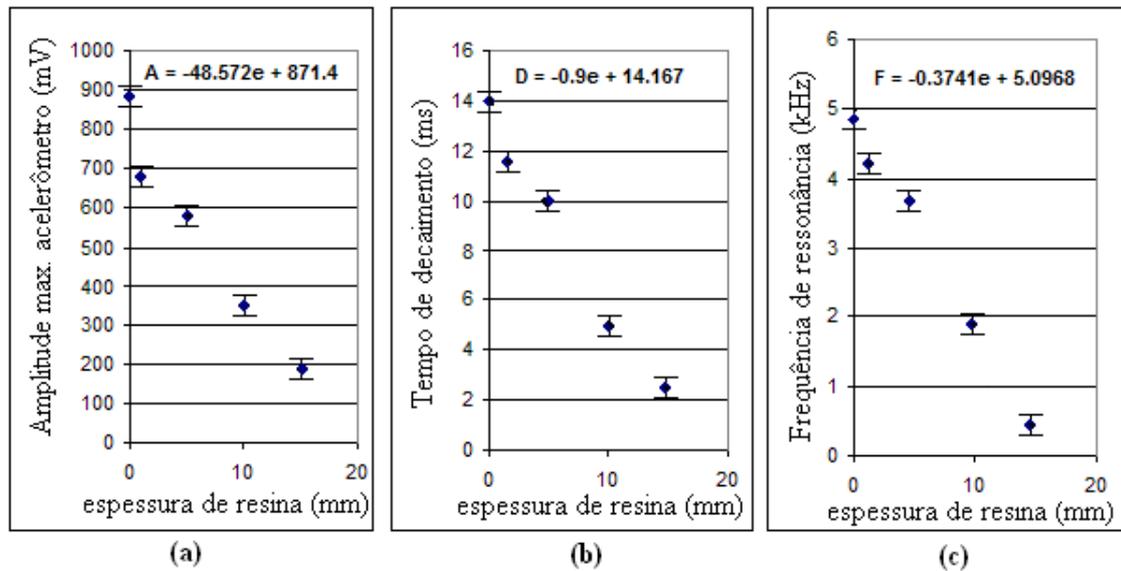


Figura 6.37: Gráficos da variação dos sinais em função da incrustação: (a) com o acelerômetro, (b) com o microfone no domínio do tempo e (c) como microfone no domínio da frequência.

A partir dos resultados experimentais com as técnicas utilizadas, as figuras de mérito linearizadas para detecção da incrustação podem ser extraídas:

- Utilizando o acelerômetro para medir a amplitude da vibração, a sensibilidade normalizada determinada para o sensor é  $S_N(A)=-0,06/\text{mm}$ .
- Utilizando o microfone para avaliar o tempo de decaimento, a sensibilidade normalizada determinada para o sensor é  $S_N(D)=-0,06/\text{mm}$ .
- Utilizando o microfone para avaliar a frequência de ressonância, a sensibilidade normalizada determinada para o sensor é  $S_N(D)=-0,07/\text{mm}$ .

A frequência de ressonância dominante depende sensivelmente da geometria do tubo sob consideração. Para diâmetros maiores, a vibração do tubo modificaria a frequência de ressonância dominante para um valor menor, enquanto que uma espessura da parede do tubo mais fina modificaria a frequência de ressonância dominante para um valor maior [75]. A posição e magnitude das faixas de frequências laterais também mudariam. Com o acelerômetro as modificações no sinal de resposta podem ser monitoradas automaticamente e continuamente, de modo a detectar a incrustação presente nos tubos [93-94].

## 6.9 Testes com uma tubulação real

Foram realizados testes com o microfone e acelerômetro em uma tubulação utilizada para transporte de petróleo, pela Petrobrás, em Guamaré-RN.

Na Figura 6.38 apresenta-se uma fotografia com a montagem utilizada nos testes. A tubulação possui um comprimento de  $2\text{ m}$ , com diâmetro de  $22\text{ cm}$  e espessura de aproximadamente  $1\text{ cm}$ , sendo composta de aço carbono. Na Figura 6.39 apresenta-se uma fotografia do interior da tubulação, que possui diferentes níveis de incrustação.

Os resultados obtidos com o microfone estão apresentados nas Figuras 6.40 e 6.41, para tubulação sem incrustação e com aproximadamente  $5\text{ mm}$  de incrustação, respectivamente. Os resultados obtidos com o acelerômetro estão apresentados nas Figuras 6.42 e 6.43, para tubulação sem incrustação e com  $5\text{ mm}$  de incrustação, respectivamente.



Figura 6.38: Fotografia da montagem utilizada nos testes com uma tubulação real.



Figura 6.39: Fotografia do interior da tubulação com diferentes níveis de incrustação.

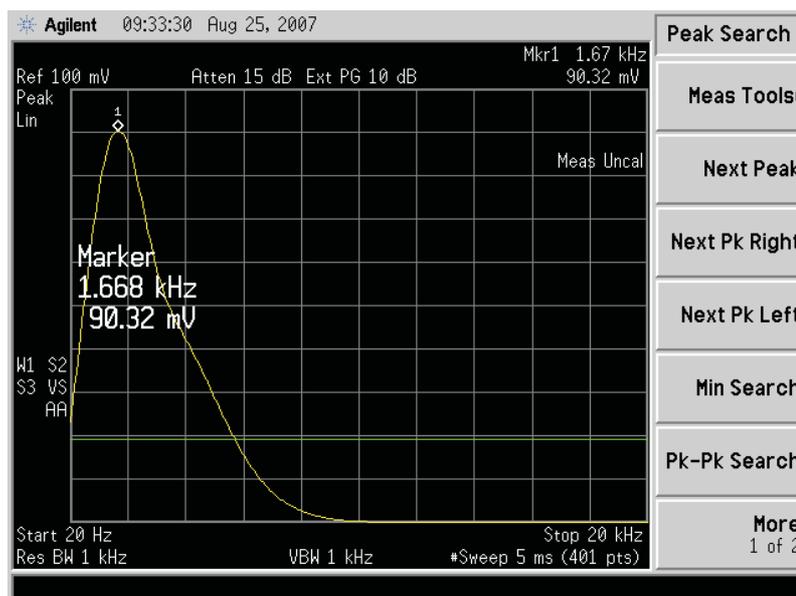


Figura 6.40: Representação do sinal obtido com o microfone, para tubulação sem incrustação (Tubulação real).

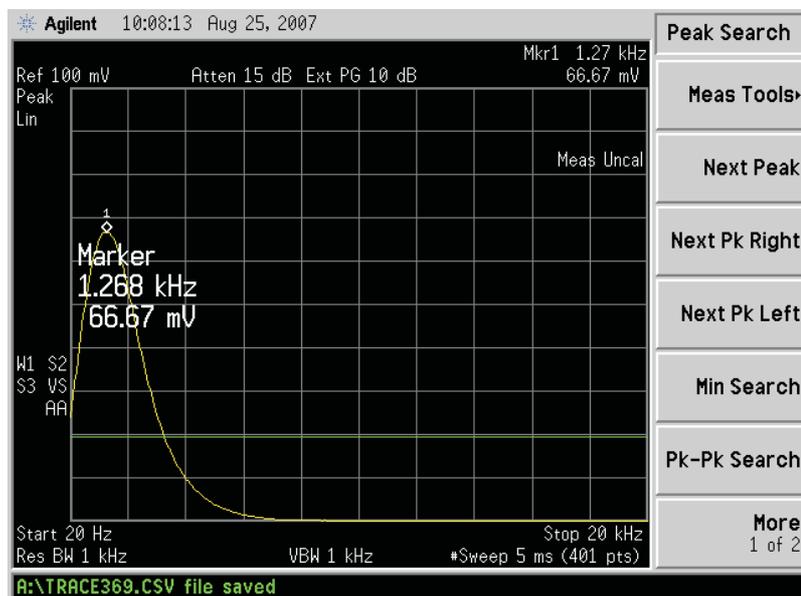


Figura 6.41: Representação do sinal obtido com o microfone, para tubulação com aproximadamente 5 mm de incrustação (Tubulação real).

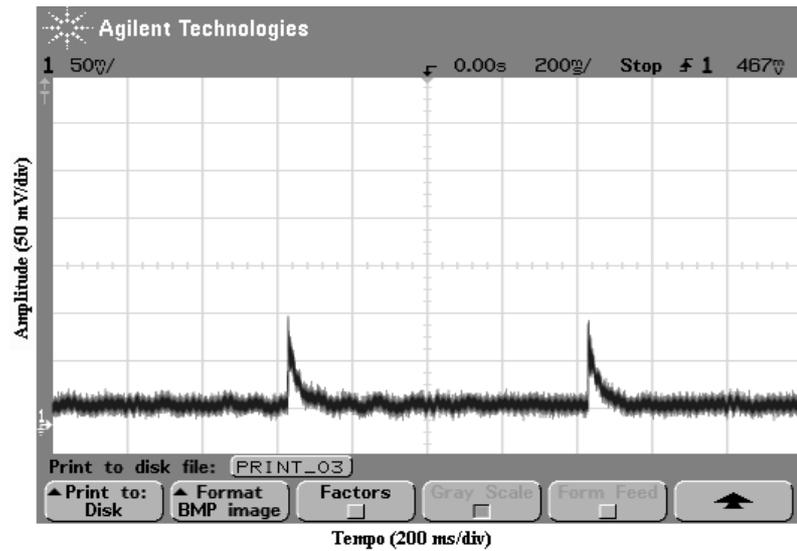


Figura 6.42: Forma de onda do sinal obtido com o acelerômetro, para tubulação sem incrustação (Tubulação real).

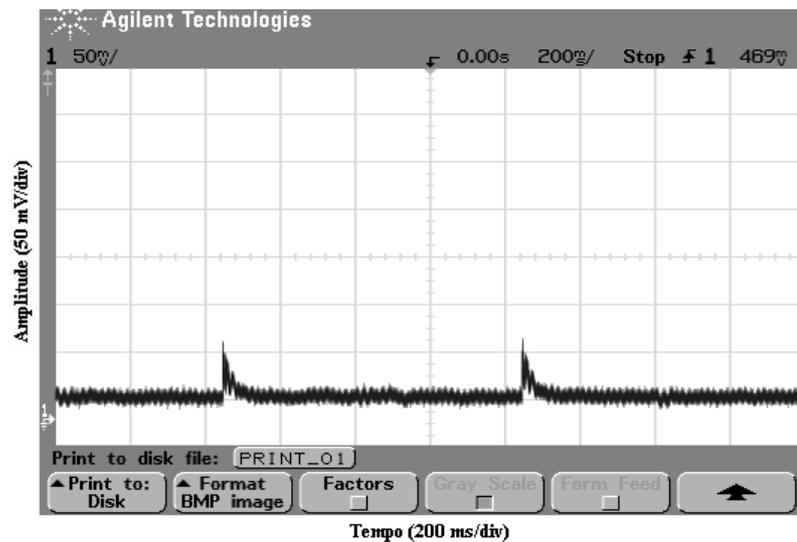


Figura 6.43: Forma de onda do sinal obtido com o acelerômetro, para tubulação com aproximadamente 5 mm de incrustação (Tubulação real).

Observa-se a redução da frequência, no teste com o microfone, com o aumento da incrustação e a redução da amplitude dos sinais, no caso do acelerômetro. Verifica-se também que os valores de referência, tubulação limpa e com incrustação, são menores que os apresentados nos testes anteriores. Isto ocorre devido as dimensões da tubulação real e de sua massa que é bem maior que a dos tubos utilizados anteriormente, reduzindo assim, as vibrações provocadas pelo teste

do martelo. Mas, como as reduções nos parâmetros ainda podem ser observadas, a incrustação pode ser detectada também neste caso.

Na Figura 6.44 é apresentado um fluxograma para utilização da terceira técnica proposta. Neste caso, realiza-se uma comparação dos parâmetros obtidos com os dados da assinatura da tubulação e com isso, se ocorrem modificações nos parâmetros, significa que a tubulação está com incrustação, caso contrário a tubulação não está com incrustação.

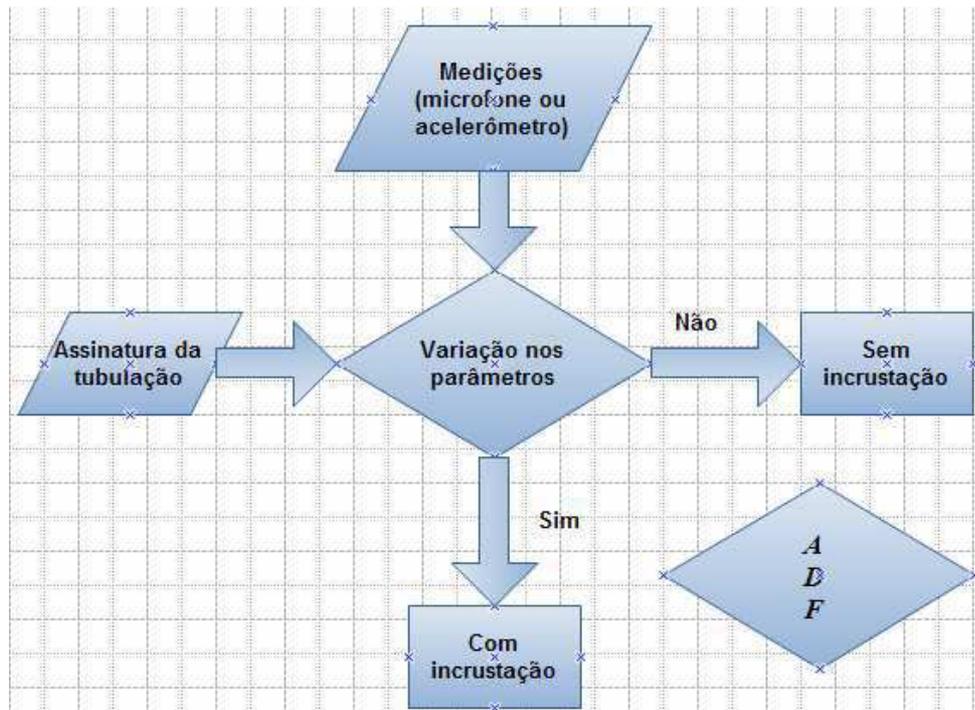


Figura 6.44: Fluxograma para utilização da técnica 3.

## 6.10 Conclusões

Na técnica apresentada neste capítulo, o teste de impacto do martelo foi empregado para detecção da incrustação em tubulações. Os métodos utilizados avaliam variações na amplitude e frequência dos sinais monitorados. Trata-se de uma técnica de monitoração não-invasiva, que apresenta vantagens em relação as técnicas invasivas.

Com esta técnica é possível avaliar o comportamento das vibrações nas tubulações monitoradas utilizando um microfone ou acelerômetro para aquisição dos dados. Esta técnica é mais simples que as anteriores, uma vez que provoca-se um impacto na tubulação e observa-se os

sinais adquiridos, sem a necessidade de processamento dos mesmos.

Os limites de detecção desta técnica estão na faixa de 1 a 20 *mm* de incrustação, considerando as condições de testes utilizadas na plataforma e nas montagens realizadas, tais como: tamanho, espessura, diâmetro e material utilizado na fabricação dos tubos, e da composição das substâncias utilizadas para simular a incrustação.

Analisando os resultados obtidos com o microfone, observa-se que o deslocamento de frequência e a redução de amplitude, fornecem informações importantes sobre a incrustação presente nas tubulações, ou seja, as reduções de amplitude nos sinais e os deslocamentos de frequência em relação aos valores obtidos com a tubulação limpa, são os indicativos da presença e aumento da incrustação nas tubulações monitoradas. As distorções nos sinais ocorrem devido as camadas de incrustação no interior dos tubos, que modificam o meio de propagação. Todas as tubulações utilizadas apresentam as mesmas características (material, espessura, diâmetro e comprimento). Assim, o método de detecção apresentado fornece resultados confiáveis, sendo representativo para detecção da incrustação de forma simples e direta.

Observando as reduções nas amplitudes dos sinais adquiridos com o acelerômetro, a incrustação pode ser detectada, uma vez que os valores obtidos com a assinatura da tubulação (tubulação limpa) são tomados como referência e as reduções nos valores de amplitude são atribuídas a incrustação (aumento na espessura da resina), que pode ser observada dentro das tubulações sob testes.

Com a análise de elementos finitos, observa-se que o aumento da camada de incrustação provoca uma redução na amplitude dos deslocamentos mecânicos, semelhante a redução da amplitude do sinal monitorado com os testes experimentais realizados com o acelerômetro.

Considerando a sensibilidade normalizada, a frequência de ressonância apresenta maior variação em relação ao aumento da incrustação.

Pode-se também avaliar diferentes pontos da tubulação e identificar os lugares onde a mesma apresenta maiores ou menores valores de espessura de incrustação, observando as modificações nos parâmetros analisados com os testes com o microfone e com o acelerômetro.

# Capítulo 7

## Conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros

### 7.1 Conclusões gerais

Neste trabalho foram apresentadas as técnicas desenvolvidas para detecção da incrustação, utilizando métodos não-invasivos, que permitem a inspeção das tubulações sem a necessidade de parar o processo de transporte do fluido. As técnicas desenvolvidas podem ser utilizadas para detectar incrustação em locais específicos das tubulações e podem auxiliar o processo de manutenção, reduzindo assim, o uso de substâncias anti-incrustantes ou do *PIG instrumentado*. Desta forma a manutenção só será realizada quando a incrustação for detectada.

A primeira técnica desenvolvida utiliza a estimação de parâmetros com a análise de sinais ultra-sônicos para detecção da incrustação. A partir de um modelo foram feitas estimações de parâmetros para análise dos pulsos ultra-sônicos. Os métodos utilizados foram baseados no modelo de pulsos Gaussianos, onde os parâmetros representam as propriedades dos pulsos. O método de estimação paramétrica, onde um modelo para o processo sob estudo é conhecido e os parâmetros deste modelo são determinados, foi utilizado nesta técnica. Com o modelo para pulsos Gaussianos, o problema de estimação baseia-se na determinação dos parâmetros do modelo e na observação de modificações destes parâmetros quando a incrustação está presente na tubulação. As desvantagens desta técnica são: os parâmetros são analisados em determinada frequência e com isso os efeitos da atenuação para outras faixas de frequências não podem ser observados; os níveis de tensão e correntes utilizados para excitar os transdutores ultra-sônicos podem ser considerados elevados para aplicações em áreas classificadas.

A segunda técnica desenvolvida utiliza Wavelets para detecção da incrustação em tubulações,

com ondas guiadas ultra-sônicas. Com os dados obtidos foi possível determinar os coeficientes Wavelets para os sinais ultra-sônicos medidos, utilizando as Wavelets Haar e Daub4. Analisando os resultados obtidos, pode-se observar que com o aumento da incrustação ocorre uma redução nos valores dos coeficientes Wavelets para os sinais ultra-sônicos, e isto é uma indicação da presença da incrustação nas tubulações monitoradas. Também foram calculadas as energias dos coeficientes Wavelets dos sinais ultra-sônicos. Analisando os resultados obtidos, pode-se observar que o aumento da incrustação provoca uma redução na energia dos coeficientes Wavelets utilizando as Wavelets Haar e Daub4. Com isso, observando as reduções nas energias dos coeficientes Wavelets, a incrustação pode ser detectada, uma vez que a energia determinada para a tubulação limpa é tomada como referência e as reduções na energia são atribuídas a incrustação, que pode ser observada dentro das tubulações da plataforma de testes. As desvantagens desta técnica são: o número de escalas utilizadas depende do sinal ultra-sônico monitorado e da frequência de amostragem utilizada; os níveis de tensão e correntes utilizados para excitar os transdutores ultra-sônicos podem ser considerados elevados para aplicações em áreas classificadas.

A terceira técnica desenvolvida utiliza o teste de impacto do martelo para detecção de incrustação em tubulações. Os métodos utilizados avaliam variações na amplitude e frequência dos sinais monitorados. Analisando os resultados obtidos como o microfone, observa-se que os deslocamentos de frequência e as reduções de amplitude, fornecem informações importantes sobre a incrustação presente nas tubulações, ou seja, as reduções de amplitude nos sinais e os deslocamentos de frequência em relação aos valores obtidos com a tubulação limpa, são os indicativos da presença e aumento da incrustação nas tubulações monitoradas. Observando as reduções nas amplitudes dos sinais monitorados com o acelerômetro, a incrustação pode ser detectada, uma vez que os valores obtidos com a assinatura da tubulação (tubulação limpa) são tomados como referência e as reduções nos valores de amplitude são atribuídas a incrustação (aumento na espessura da resina). As desvantagens desta técnica são: os ruídos externos podem alterar as medições com o microfone; vibrações provocadas por algum evento externo podem alterar as medições com o acelerômetro.

A técnica que utiliza a análise de vibrações possui vantagens em relação as técnicas que utilizam estimação de parâmetros e Wavelets, tais como: os custos com os acelerômetros e com os microfones que são bem mais baratos que os transdutores ultra-sônicos (os transdutores custam em média 2.500 reais, enquanto o microfone e o acelerômetro custam em média 200,00 reais cada um); os níveis de tensão e corrente utilizados nos circuitos na técnica de análise de vibrações (fontes de 12V / 500mA) são bem menores em relação aos níveis de tensão e corrente utilizados nos circuitos de excitação dos transdutores (fontes de tensão com 100V / 1A), que

devem ser consideradas se os testes forem realizados em áreas classificadas.

Considerando as sensibilidades normalizadas, os parâmetros relacionados com o tempo de retorno e com a amplitude (Técnica 1), como também o parâmetro relacionado com o valor máximo da energia da terceira escala (Técnica 2) apresentam maior variação em relação ao aumento da incrustação comparado com os demais parâmetros analisados nas técnicas propostas.

Com as técnicas desenvolvidas pode-se também avaliar diferentes pontos da tubulação e identificar os lugares onde a tubulação apresenta maior ou menor valor de espessura de incrustação, observando-se as modificações nos parâmetros analisados em cada teste, reduzindo assim os custos com manutenção e agilizando os processos de monitoramento em sistemas com tubulações.

As técnicas propostas podem ser utilizadas de forma conjunta para análise de um número maior de parâmetros, aumentando assim, a capacidade de detecção da incrustação nas tubulações monitoradas.

## 7.2 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas as sugestões para continuação deste trabalho:

- Análise de diferentes composições da incrustação para verificação da modificação nos parâmetros observados.
- Melhoramentos nas técnicas desenvolvidas para determinação de forma quantitativa da incrustação com diferentes composições e tubos com diferentes materiais.
- Utilização de uma matriz de transdutores ultra-sônicos para detecção da incrustação através de imagens do interior da tubulação.
- Verificação da influência da aplicação de diferentes níveis de impacto com diferentes frequências na mesma tubulação, para análise dos sinais monitorados.

# Referências Bibliográficas

- [1] J. L. Rose. *Recent Advances in Guided Wave NDE*. IEEE Ultrasonics Symposium. pp.761-770. 1995.
- [2] E. Cam, M. Lei, I. Kocaarslan and C. Taplamacioglu. *Defect Detection in a Cantilever Beam from Vibration Data*. Kirikkale University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics. Kirikkale, 2002. (Relatório).
- [3] A .S . Krisher. *Technical Information Regarding Coupon Testing*. ASK Associates. St. Louis, Missouri. November, 2003.
- [4] C. B. Panchal. *Fouling mitigation of industrial heat exchange equipment*. Bengell House, New York. 1997.
- [5] J. J. Silva, M. G. Wanzeller, P. A. Farias, J. S. Rocha Neto. *Development of circuits for excitement and reception in ultrasonic transducers for generation of guided waves in hollow cylinders for fouling detection*. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Ottawa, Ontario, Canada. 17-19 May, 2005.
- [6] P. Castelline, G. M. Revel, L. Scalise. *Measurement of vibrational modal parameters using laser pulse excitation techniques*. Elsevier - Measurement. Vol. 35, pp. 163-175, 2004.
- [7] S. J. Ahn, W. B. Jeong, W. S. *Improvement of impulse response spectrum and its application*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 288, pp. 1223-1239, 2005.
- [8] P. K. Roy, N. Ganesan. *Transient response of a cantilever beam subject to on impulse load*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 183, pp. 873-890, 1995.
- [9] A. J. Stanley, N. Canesan. *Impulse response of cylindrical shells with a discontinuity in the thickness subjected to on axisymmetric load*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 184, pp. 369-387, 1995.

- 
- [10] M. H. H. Shen, C. Pierre. *Free vibrations of beams with a single-edge crack*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 170, pp. 237-259, 1994.
- [11] J. J. Silva, A. M. N. Lima, F. H. Neff, J. S. Rocha Neto. *Fouling Detection based on Vibration Analysis with the Hammer Impact Test*. IMTC 2007 - Instrumentation and Measurement Technology Conference Warsaw, Poland, 2007.
- [12] C. H. F. Oliveira, C. S. Camerini. *Pig Instrumentado da Petrobras: Resultados e perspectivas*. XXI Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos. Salvador, agosto, 2002.
- [13] Seção Especial Petróleo e Gás, Monitoramento 24h - Química Aplicada. *Pig Instrumentado*. Revista Ciência Hoje, CH 205. Edição: Roberto Barros e Carvalho, Julho, 2004.
- [14] R. A. Sigwalt, C. O. R. Negrão, P. C. Tonin. *Influência do Escoamento no Processo de Incrustação*. Departamento Acadêmico de Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Seminário de Ciência e Tecnologia, 2002.
- [15] P. C. Tonin, C. O. R. Negrão. *Estudos Preliminares do Processo de Incrustação em Trocadores de calor*. I Encontro dos Programas de Recursos Humanos em Petróleo e Gás Natural do Paraná. CEFET-PR e UFPR. Curitiba, 2001.
- [16] V. A. M. Branco, G. A. Mansoori, L. C. A. Xavier, S. J. Park and H. Manafi. *Asphaltene Flocculation and Collapse from Petroleum Fluids*. Journal of Petroleum Science and Engineering. Elsevier, 2001.
- [17] G. A. Mansoori. *Modeling of Asphaltene and other Heavy Organics Depositions*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1997, vol. 17, pp. 101-121. Elsevier Science.
- [18] K. R. Lohr and J. L. Rose. *Ultrasonic Guided Wave and Acoustic Impact Methods for Pipe Fouling Detection*. Journal of food engineering. Elsevier Science, March, 2002.
- [19] G. A. Mansoori. *Deposition and Fouling of Heavy Organic Oils and Other Compounds*. 9th International Conference on Properties and Phase Equilibrium for Product and Process Design. (PPEPPD 2001), May 20-25, 2001, Kurashiki, Okayama, JAPAN.
- [20] S. Priyanto, G. A. Mansoori and A. Suwono. *Structure and Properties of Micelles and Micelle Coacervates of Asphaltene Macromolecule*. Proceedings of AIChE Annual Meeting, Session [90], 2001.
- [21] J. Escobeto, G. A. Mansoori, C. Balderas-Joers, L. J. Carranza-Becerra and M. A. Mendes-Garcia. *Heavy Organic Deposition During Oil Production From a Hot Deep Reservoir: A*

- 
- Field Experience*. Proceedings of the 5th Latin American and Caribbean Pet. Eng. Conf. and Exhibits. Rio de Janeiro, Brazil. September, 1997.
- [22] G. A. Mansoori. *Physicochemical Basis of Arterial Blockage/Fouling Prediction and Prevention*. University of Illinois at Chicago, USA. September, 2001.
- [23] J. L. Santin. *Ultra-som: Técnica e Aplicação*. Qualitymark Ed. Rio de Janeiro, 1996.
- [24] J. L. Rose. *A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential*. Journal of pressure vessel technology. August, 2002, vol. 124. pp. 273-282.
- [25] T. R. Hay and J. L. Rose. *Fouling Detection in the Food Industry Using Ultrasonic Guided Waves*. Food control. Elsevier Science, September, 2002.
- [26] M. J. Quarry, J. L. Rose, A. V. Bray and L. J. Corley. *Guided Waves for Corrosion Detection Potencial in Piping under Insulation*. ASNT Fall Conference and Quality Testing. pp. 27-29. October, 1997.
- [27] H. Kwum, S. Y. Kim and G. M. Light. *Long-range Guided Wave Inspection of Structures Using the Magnetostrictive Sensor*. Applied Physics Division, Department of NDE Science and technology, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, USA. 2002.
- [28] J. Barshinger and J. L. Rose. *Guided Wave Resonance Tuning for Pipe Inspection*. Journal of Pressure Vessel Technology. Vol 124. pp. 303-310. August, 2002.
- [29] C. E. N. Gatts, M. H. S. Siqueira, R. R. da Silva, J. M. A. Rebello. *The use of ultrasonic guided waves and wavelets analysis in pipe inspection*. Ultrasonics-Elsevier. Vol. 41, pp. 785-797. 2004.
- [30] L. F. Brown, D. L. Carlson. *Ultrasound transducer models for piezoelectric polymer films*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 36, pp. 313-318. 1989.
- [31] A. H. Nayfeh, D. E. Chimenti. *Propagation of Guided Waves in Fluid-Coupled Plates of Fiber-Reinforced Composite*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 83, pp. 1736-1743. 1988.
- [32] R. B. Thompson, S. C. Lee, J. F. Smith. *TRelative Anisotropies of Plane Waves and Guided Modes in Thin Orthotropic Plates: Implication for Texture Characterization*. Ultrasonics, vol. 25, pp. 133-137. 1987.

- 
- [33] C. M. Fortunko, R. B. King, and M. Tan. *Nondestructive evaluation of planar defects in plates using low-frequency shear horizontal waves*. J. Appl. Phys. Vol. 53, pp. 3450-3458, 1882.
- [34] M. G. Silk, K. P. Bainton. *The Propagation in Metal Tubing of Ultrasonic Wave Modes Equivalent to Lamb Waves*. Ultrasonics, vol.17, pp. 11-19. 1979.
- [35] H. M. Frost. *Electromagnetic-Ultrasound Transducers: Principles, Practice and Applications*. Physical Acoustics, New York: Academic Press, vol. 14, pp. 179-275. 1978.
- [36] T.R. Meeker and A.H. Meitzler. *Guided Wave propagation Elongated Cylinders and Plates*. Acoust. Vol. 1A, pp. 111-167. 1964.
- [37] D. C. Gazis. *Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 31, pp. 568-573. 1959.
- [38] I. A. Viktorov. *Rayleigh-type waves on a cylindrical surface*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 4, pp.131-136, 1958.
- [39] R. M. Cooper, P. M. Naghdi. *Propagation of Nonaxially Symmetric Waves in Elastic Cylindrical Shells*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 29, pp. 1365-1373. 1957.
- [40] E. V. Malyarenko and M. K. Hinders. *Fan Beam and Double Crosshole Lamb Wave Tomography for Mapping Flaws in Aging Aircraft Structures*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 108, pp. 1631-1640. 2000.
- [41] S. V. Moller. *Princípios físicos de radiografia industrial e gamagrafia*. LMF - Laboratório de Mecânica dos Fluidos Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2003. (Apostila)
- [42] R. Andreucci. *Ensaio por Ultra-som: Aspectos Básicos*. ABENDE. Ed.3, 2002.
- [43] N. J. Carino. *The Impact-echo Method: An Overview*. Proceedings of the 2001 Structures Congress and Exposition. Washington, USA, May, 2001.
- [44] N. J. Carino, M. Sansalone and N. N. Hsu. *A Point Source Point Receiver Technique for Flaw Detection in Concrete*. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 83. pp. 199-208. April, 1986.
- [45] K. Mori, A. Spagnoli, Y. Murakami, G. Kondo and I. Torigoe. *A New Non-contacting Nondestructive Testing Method for Defect Detection in Concrete*. Elsevier Science. February, 2002.

- 
- [46] M. Sansalone, J. M. Lin and W. B. Streett. *A Procedure for Determining P-wave Speed in Concrete for Use in Impact-echo Testing Using a P-wave Speed Measurement Technique*. ACI Materials Journal, Vol. 94. pp. 532-539. December, 1997.
- [47] M. Sansalone, J. M. Lin and W. B. Streett. *A Procedure for Determining Concrete Pavement Thickness Using a P-wave Speed Measurement and Impact-echo Method*. American Concrete Institute, Farmington, MI. 1997.
- [48] K. Balasubramaniam and Y. Ji. *Influence of Skewing on the Acoustic Wave Energy Vector Behavior in Anisotropic Material Systems*. J. Sound Vib. Vol. 236, pp. 166-175. 2000.
- [49] B. R. Tittmann. *Acoustic Microscopy for the Characterization of High Temperature Composites Carbon-Carbon*. Proc., Joint Japan-USA Meeting on Composites: ICCW, pp. 2-10. 1991.
- [50] B. A. Auld, and G. S. Kino. *Normal Mode Theory for Acoustic Waves and Their Application to the Interdigital Transducer*. IEEE Trans. Educ. ED-18, pp. 898-908. 1971.
- [51] T. Tokuoka and Y. Iwashimizu. *Acoustical Birefringence of Ultrasonic Waves in Deformed Isotropic Elastic Media*. Int. J. Solids Struct. Vol. 4, pp. 383-389. 1968.
- [52] J. E. Greenspon. *Vibrations of Thick and Thin Cylindrical Shells Surrounded by Water*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 33, pp. 1321-1328. 1961.
- [53] E. Henneke, D. Chimenti and E. Papadakis. *Fundamental Principles of Ultrasonic Wave Propagation*. Nondestructive Testing HandBook. Ed. 2, vol. 7. ASNT. 1991.
- [54] J. L. Rose. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 2004.
- [55] J. J. Silva. *Desenvolvimento de uma Plataforma para Detecção de Incrustação em Dutos*. Dissertação de Mestrado. UFCG. Brasil. 2005.
- [56] C. M. Fortunko. *Generation and reception of ultrasonic signal*. Ultrasonic Testing Equipment. Nondestructive Testing Handbook. 2 ed. Ultrasonic Testing. Vol. 7. USA. 1991.
- [57] P. Calmon, O. Roy, Ph. Benoist. *Simulation of Ultrasonic Examination*. IEEE Ultrasonic Symposium. pp.1265-1269, 2000.
- [58] P. He. *Simulation of Ultrasound Pulse Propagation in Lossy Media Obeying a Frequency Power Law*. IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Vol. 45, No. 1, 1998.

- 
- [59] J. Saniie, X. M. Jin. *Model-Based Frequency Estimation for Ultrasonic NDE Applications*. IEEE Ultrasonics Symposium. pp. 1129-1132, 1994.
- [60] W. P. Mason, H. J. McSkimm. *Attenuation and Scattering of High Frequency Sound Waves in Metals and Glasses*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 19, pp.464-473. 1947.
- [61] R. Dermili and J. Saniie. *Model based time-frequency estimation of ultrasonic echoes for NDE applications*. IEEE Ultrasonics Symposium. 2000.
- [62] R. Dermili and J. Saniie. *Model-based estimation of ultrasonics echoes - Part I: Analysis and Algorithms*. IEEE Transactions on ultrasonics, ferroeletrics and frequency control. Vol. 48, No. 3, May. 2001.
- [63] R. Dermili and J. Saniie. *Model-based estimation of ultrasonics echoes - Part II: Non-destructive evaluation applications*. IEEE Transactions on ultrasonics, ferroeletrics and frequency control. Vol. 48, No. 3, May. 2001.
- [64] C. Junsheng, Y. Dejie, Y. Yu. *Time-energy density analysis based on wavelet transform*. NDT e E International. Pp. 569-572. Elsevier. 2005.
- [65] J. S. Walker. *Fourier analysis and Wavelet Analysis*. Notices of the AMS. Vol. 44, n° 6, pp. 658-670. 1997.
- [66] C. H. Kim, R. Aggarwal. *Wavelet transforms in power systems: Part1 General introduction to the wavelet transforms*. Power Engineering Journal. Pp. 81-87. 2000.
- [67] T. K. Sarkar, C. Su, R. Adve, M. Salazar-Palma, L. Garcia-Castillo, R. R. Boix. *A Tutorial on Wavelets from an Electrical Engineering Perspective, Part 1: Discrete Wavelet Techniques*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol.40, No. 5, October, 1998.
- [68] C. H. Kim, R. Aggarwal. *Wavelet transforms in power systems: Part 2 Examples of application to actual power system transients*. Power Engineering Journal. Pp.193-2002. 2001.
- [69] C. S. Burrus, A. G. Ramesh, H. Guo. *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1998.
- [70] M. O. Domingues, O. Mendes Jr., A. M. Costa. *On wavelet techniques in atmospheric sciences*. Advances in Space Research. Elsevier. Pp. 831-842. 2005.
- [71] I. Daubechies, S. Mallat, A. Willsky *Introduction to the special issue on wavelet transforms and multiresolution signal analysis*. IEEE transaction on Information Theory 38 (2), 528-531, 1992.

- 
- [72] Y. Narkis. *Identification of crack location in vibrating simply supported beams*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 172, pp. 549-558, 1994.
- [73] H. Nahvi, M. Jabbari. *Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model*. International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 47, pp. 1477-1497, 2005.
- [74] S. S. Law, Z. R. Lu. *Crack identification in beam from dynamic responses*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 285, pp. 967-987, 2005.
- [75] J. F. Saéz, L. Rubio, C. Navarro. *Approximate calculation of the fundamental frequency for bending vibrations of cracked beams*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 225, pp. 345-352, 1999.
- [76] A. K. Pandey, M. Biswas, M. M. Samman. *Damage detection from changes in curvature mode shapes*. Elsevier - Journal of Sound and Vibration. 2003.
- [77] W. P. Lai, W. Fang. *Novel bulk acoustic wave hammer to determinate the dynamic response of microstructure using pulsed broad bandwidth ultrasonic transducers*. Elsevier - Sensors and Actuators. Vol. 96, pp. 43-52, 2002.
- [78] A. Messina, E. J. Williams, T. Contursi. *Structural damage detection by a sensitivity and statistical - Based method*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 216, pp. 791-808, 1998.
- [79] L. Majunder, C. S. Manohar. *A time-domain approach for damage detection in beam structures using vibration data with a moving oscillator as on excitation source*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 268, pp. 699-717, 2003.
- [80] J. K. Sinha, M. I. Friswell, S. Edwards. *Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 251, pp. 13-38, 2002.
- [81] Y. Champoux, V. Cotoni, B. Paillard, O. Beslin. *Moment excitation of structures using two synchronized impact hammers*. Journal of Sound and Vibration. Vol. 263, pp. 515-533, 2003.
- [82] D. Hansenlman and B. Littlefield. *Mastering MATLAB - A comprehensive tutorial and reference*. Prentice Hall. 1996.
- [83] J. J. Silva, A. M. N. Lima, J. S. Rocha Neto. *Detecção de incrustação em tubulações utilizando estimação de parâmetros e ondas guiadas ultra-sônicas*. XVI Congresso Brasileiro de Automática (XVI CBA). Salvador, Brasil, Outubro, 2006.

- 
- [84] J. J. Silva, A. M. N. Lima, J. S. Rocha Neto. *Fouling detection based on ultrasonic guided waves and parameter estimation*. 3rd IFAC Symposium on System, Structure and Control - SSSC 2007. Foz do Iguaçu, Brazil, October, 2007.
- [85] J. J. Silva, A. M. N. Lima, J. S. Rocha Neto. *Fouling detection based on parameter estimation*. System, Structure and Control. In-Teh Education and Publishing. Viena, Austria, 2008.
- [86] J. J. Silva, J. S. Rocha Neto. *Development of circuits for excitation and reception in ultrasonic transducers for generation of guided waves in hollow cylinders for fouling detection*. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2008. Vol. 57, pp. 1149-1153.
- [87] J. J. Silva, A. M. N. Lima, J. S. Rocha Neto. *Wavelet-Based Method for Fouling Detection Using Ultrasonic Guided Waves*. IEEE International Ultrasonics Symposium, Vancouver, British Columbia, Canada, 2006.
- [88] J. J. Silva, K. M. Silva, A. M. N. Lima, J. S. Rocha Neto. *Análise de Sinais Ultra-Sônicos para Detecção de Incrustação Utilizando Wavelets*. XVII CBA. Juiz de Fora, Brasil, Setembro, 2008.
- [89] J. J. Silva, K. M. Silva, A. M. N. Lima, J. S. Rocha Neto. *Fouling Detection Based on Analysis of Ultrasonic Guided Waves Using Wavelet Transform*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. United Kingdom, July, 2008.
- [90] Analog Device. *Low-cost 2g Dual-axis Accelerometer with Duty Cycle output*. Analog Device, USA, 2003.
- [91] J. J. Silva, A. M. N. Lima, F. H. Neff, J. S. Rocha Neto. *Non-invasive, fast detection of internal fouling layers in tubes and ducts by acoustic vibration analysis with microphone*. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2009. Vol. 58, pp. 108-114.
- [92] J. J. Silva, A. M. N. Lima, F. H. Neff, J. S. Rocha Neto. *Analysis and Comparison of Acoustic Tests Based on the Hammer Impact for Fouling Detection using Microphone and Accelerometer as Vibration Sensors*. Measurement Journal - Elsevier, 2007. (Artigo Submetido).
- [93] J. J. Silva, A. M. N. Lima, F. H. Neff, J. S. Rocha Neto. *Acoustic Tests Based on the Hammer Impact for Fouling Detection using Microphone and Accelerometer*. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2008. (Artigo Submetido).

- [94] J. J. Silva, A. M. N. Lima, F. H. Neff, J. S. Rocha Neto. *Vibration Analysis for Fouling Detection using Hammer Impact Test and Finite Elements*. IEEE IMTC 2008. Vancouver, Canada, 2008.