

Desenvolvimento de uma plataforma para detecção de incrustação em dutos

Jaidilson Jó da Silva

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Processamento da Informação

José Sérgio da Rocha Neto, D.Sc.
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil
©Jaidilson Jó da Silva, Março de 2005



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

S586d Silva, Jaidilson Jó da
2005 Desenvolvimento de uma plataforma para detecção de incrustação em dutos /
Jaidilson Jó da Silva. — Campina Grande: UFCCG, 2005.
82f.

Inclui Bibliografia

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro de Ciências e
Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

1— Engenharia Elétrica 2— Plataforma 3— Detecção 4— Incrustação
I— Título

CDU 621.3

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA PARA DETECÇÃO DE
INCRUSTAÇÃO EM DUTOS**

JAIDILSON JÓ DA SILVA

Dissertação Aprovada em 04.03.2005



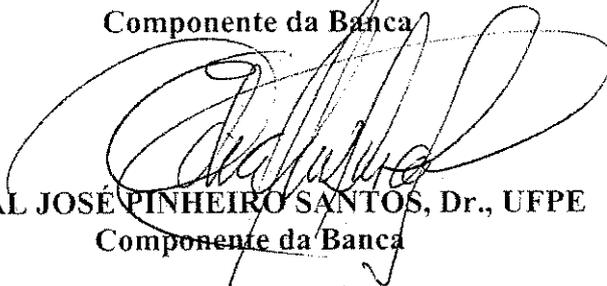
JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.Sc., UFCG
Orientador



ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG
Componente da Banca



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



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

CAMPINA GRANDE - PB
Março - 2005

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Odete Jó e João Antônio, e aos meus irmãos, Jaidete, Jainete e João Paulo. A eles dedico com amor.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter sempre me iluminado.

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

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

Aos professores José Sérgio, Miguel Wanzeller, Antonio Marcos, Péricles Barros, Angelo Perkusich e ao engenheiro Paulo Farias pela orientação e ajuda, sem a qual este trabalho não seria realizado.

Aos amigos, de forma especial à Kleber Melo, Júlio César, Bruno José, Thiago Alberto e Marcos Aurélio, pelo apoio incondicional.

Aos amigos de república André, Daniel, Matheus, Kécio, Carlos, Alexandre, Luciano e Diego pelo companheirismo e incentivo.

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

Ao CNPq, pela bolsa de pesquisa.

A PETROBRÁS UN-RNCE, pelo apoio financeiro dado a este projeto.

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

Agradeço a todos.

Resumo

Nesta dissertação é apresentado o projeto de uma plataforma para detecção e monitoramento da incrustação em dutos. A incrustação é um problema que ocorre no transporte de fluidos em tubulações devido ao acúmulo de substâncias de origem orgânica ou inorgânica na superfície interna das tubulações. Este é um processo que ocorre nas indústrias química, alimentícia, farmacêutica e petrolífera, causando vários problemas devido ao acúmulo das substâncias que provocam a redução no diâmetro interno das tubulações.

Entre as técnicas utilizadas para detecção e monitoramento da incrustação e corrosão, optou-se por realizar testes utilizando ultra-som devido as suas vantagens, tais como: grande poder de penetração, alta sensibilidade, grande precisão, além de ser uma técnica não invasiva. O método que utiliza ondas guiadas foi o escolhido para verificar a capacidade deste método na detecção da incrustação. Foram projetados, desenvolvidos e testados circuitos para excitação e recepção dos sinais nos transdutores de ultra-som que são utilizados na plataforma.

Com a plataforma montada, os ensaios para medição e avaliação do processo de incrustação podem ser realizados em diferentes condições de temperatura, já que na plataforma desenvolvida, existe um módulo para controlar a temperatura das substâncias sob testes.

Com o desenvolvimento da plataforma para detecção da incrustação, pretende-se reduzir a ocorrência de falhas em dutos que podem causar danos ao meio ambiente; evitar a perda da capacidade operacional dos sistemas de transporte de fluidos, aumentando a segurança; otimizar a mão de obra para instalação e rapidez na obtenção das informações sobre o processo de incrustação.

Abstract

In this dissertation the design of a platform is presented for detection and monitoring of the fouling in tubes. The fouling is a problem that happens in the transport of fluids in piping due to the accumulation of substances of organic or inorganic origin in the internal piping surface. This is a process that happens in the chemistry, food, pharmaceutical and petroleum industries, causing several problems due to the accumulation of substances that cause the reduction in the internal piping diameter.

Among the techniques used for detection and monitoring of the fouling and corrosion, it has been opted in accomplishing tests using ultrasound due their advantages, such as: great penetration power, high sensibility, great precision, besides being a no invasive technique. The method that uses guided waves was chosen to verify the capacity of this method in the detection of the fouling. They have been designed, developed and tested circuits for excitation and reception of the signal in the ultrasound transducers that are used in the platform.

With the mounted platform, the tests for measurement and evaluation of the fouling process can be accomplished at different temperature conditions, since in the developed platform there is a module to control the temperature of the substances under tests.

With the development of the platform for detection of the fouling, it intends to reduce the occurrence of flaws in tubes that can cause damages to the environment; to avoid the loss of the operational capacity of the systems of transport of fluids, increasing the safety; to optimize the work hand for installation and speed in the obtaining of the information on the fouling process.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Sinopse dos capítulos	2
2	Características gerais do processo de incrustação	4
2.1	Introdução	4
2.2	Aspectos gerais	6
2.3	Conclusões	9
3	Técnicas de detecção da incrustação	10
3.1	Introdução	10
3.2	Cupom de massa	10
3.2.1	Requisitos para testes com cupons	12
3.2.2	Avaliação do cupom após a exposição	13
3.3	Sensor de resistividade elétrica	14
3.3.1	Princípio de operação	16
3.3.2	Tipos de sensores de resistência elétrica	18
3.3.3	Cálculo da taxa de corrosão	19
3.4	Ultra-som	21
3.4.1	Teoria sobre ultra-som	21
3.4.2	Ondas guiadas	25
3.4.3	Ondas guiadas em dutos	28
3.4.4	Sensores usados para gerar ondas guiadas	30
3.4.5	Método do impacto acústico	32
3.5	Conclusões	41
4	Testes preliminares utilizando um aparelho de ultra-som	42
4.1	Introdução	42
4.2	Testes realizados	44
4.3	Conclusões	49
5	Plataforma para detecção da incrustação em dutos	50
5.1	Introdução	50
5.2	Projeto da plataforma para realização dos ensaios	50
5.3	Desenvolvimento dos circuitos do pulsador e receptor ultra-sônico	54

5.3.1	Desenvolvimento do pulsador	54
5.3.2	Desenvolvimento do receptor	58
5.4	Conclusões	63
6	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	64
6.1	Conclusões	64
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	65
	Bibliografia	66

Lista de Figuras

3.1	Tipos de cupons de perda de massa.	11
3.2	Exemplo de um cupom, antes (a) e depois (b) de ser atingido pela corrosão.	12
3.3	Tipos de sensores de resistência elétrica.	15
3.4	Estrutura de um sensor de resistência elétrica.	17
3.5	Gráfico da relação entre as leituras da resistência elétrica em função do tempo.	17
3.6	Tipos de geometrias dos sensores de resistência elétrica.	18
3.7	Diagrama da transmissão direta (a) e por reflexão (b) com incidência normal.	23
3.8	Diagrama da transmissão direta (a) e por reflexão (b) com incidência oblíqua.	24
3.9	Geração de ondas guiadas a partir da interferência das ondas transversal e longitudinal.	26
3.10	Deslocamento das partículas para ondas longitudinal e transversal.	27
3.11	Detecção de incrustação com ondas guiadas cicunferencial (a) e longitudinal (b).	29
3.12	Sensores usados em ondas guiadas: Transdutor EMAT (a), transdutor com feixes angulares (b) e transdutores comb (c) e (d).	31
3.13	Esboço do método de impacto acústico.	32
3.14	Ondas de pressão causadas pelo impacto na superfície de uma placa.	33
3.15	Esquema do método do impacto-eco.	35
3.16	Princípio da análise de freqüência.	36
3.17	Exemplos de espectros de amplitude.	38
3.18	Métodos utilizados com o impacto-eco.	40
4.1	Fotografia do equipamento de ultra-som utilizado.	43
4.2	Fotografia da montagem utilizando um equipamento de ultra-som.	44
4.3	Fotografia do detalhe do acoplamento entre os transdutores e o tubo.	45
4.4	Representação da tela do osciloscópio com os sinais: transmitido (a) e recebido (b).	46
4.5	Representação da tela do osciloscópio ilustrando a redução na amplitude do sinal recebido após dois dias devido ao ressecamento do acoplante. (a) Sinal transmitido e (b) Sinal recebido.	47
4.6	Fotografia da tela do equipamento de ultra-som ilustrando a redução na amplitude do sinal recebido com uma <i>interface</i> no interior do tubo. (a) Tubo limpo. (b) Tubo com uma <i>interface</i> em seu interior.	49
5.1	Diagrama da plataforma desenvolvida para realização dos testes.	51
5.2	Fotografia das tubulações da plataforma desenvolvida para realização dos testes com as resistências de aquecimento e válvula manual.	52

5.3	Fotografia do reservatório, módulo de controle e bomba centrífuga utilizada na plataforma.	52
5.4	Fotografia da malha de refrigeração.	53
5.5	Diagrama de blocos do circuito pulsador.	55
5.6	Diagrama esquemático do circuito para o pulsador ultra-sônico.	56
5.7	Gráfico da forma de onda na saída do circuito pulsador.	56
5.8	Representação da tela do osciloscópio mostrando a saída do pulsador.	57
5.9	Diagrama de blocos simplificado do receptor.	58
5.10	Diagrama esquemático do circuito receptor.	58
5.11	Representação da tela do osciloscópio mostrando a saída do receptor no modo RF.	59
5.12	Representação da tela do osciloscópio com os sinais transmitido (a) e recebido (b) sem <i>interface</i> no interior do tubo.	60
5.13	Representação da tela do osciloscópio com o sinal transmitido (a) e recebido (b) com <i>interface</i> no interior do tubo.	60
5.14	Representação da tela do osciloscópio mostrando a saída do pulsador conectado ao transdutor (transmissor).	61
5.15	Diagrama esquemático do circuito pulsador modificado.	62
5.16	Representação da tela do osciloscópio mostrando a saída do pulsador modificado conectado ao transdutor (transmissor).	62

Lista de Tabelas

3.1	Fator de conversão para diversas unidades da taxa de corrosão.	13
3.2	Valores de impedância acústica.	35
3.3	Tipos de acoplantes e suas propriedades.	39
4.1	Valores das amplitudes dos sinais monitorados durante os testes no primeiro dia (16/06/2004).	46
4.2	Valores das amplitudes dos sinais monitorados durante os testes no segundo dia (17/06/2004).	47
4.3	Valores percentuais das amplitudes dos sinais monitorados utilizando glicerina como acoplante (08/07/04).	48
4.4	Valores percentuais das amplitudes dos sinais monitorados utilizando glicerina como acoplante após alguns dias (20/07/04).	48

Lista de Símbolos

A	- Área da seção transversal
A_m	- Área da superfície do metal
C_C	- Taxa de corrosão utilizando o cupom de perda de massa
C_R	- Taxa de corrosão utilizando o sensor de resistência elétrica
d	- Distância entre a superfície sob teste e a interface refletida
D	- Densidade
E	- Módulo de elasticidade
f	- Freqüência
K	- Fator de conversão
L	- Comprimento do elemento
m	- Massa
M	- Perda de metal
P	- Fator multiplicativo
R	- Resistência elétrica
S	- Sinal linearizado utilizado no método da resistência elétrica
t_C	- Tempo de exposição do cupom
v	- Velocidade
v_{acril}	- Velocidade do ultra-som no acrílico
v_{fase}	- Velocidade de fase
v_i	- Velocidade da onda incidente
v_l	- Velocidade da onda longitudinal
v_P	- Velocidade da onda-P
v_{PP}	- Velocidade da onda-P através da espessura da placa
v_R	- Velocidade da onda-R
v_S	- Velocidade da onda-S
v_t	- Velocidade da onda transmitida
v_T	- Velocidade da onda transversal
V	- Amplitude final da onda
V_0	- Amplitude inicial da onda
x	- Distância percorrida pela onda
Z_1	- Impedância acústica do meio 1
Z_2	- Impedância acústica do meio 2
α	- Coeficiente de atenuação
β	- Módulo volumétrico
λ	- Comprimento de onda

σ	-	Constante de Lamé
μ	-	Constante de Lamé
ν	-	Taxa de Poisson
ρ	-	Resistividade
θ_i	-	Ângulo incidente
θ_t	-	Ângulo de transmissão
\mathcal{R}	-	Coefficiente de reflexão
Δt	-	Intervalo de tempo de retorno da onda-P
Δt_R	-	Tempo transcorrido entre medidas no método da resistência elétrica

Capítulo 1

Introdução

Um problema que ocorre no transporte de um fluido em tubulações é o acúmulo de substâncias de origem orgânica e ou inorgânica na superfície interna da tubulação. Este processo ocorre nas indústrias química, alimentícia, farmacêutica e petrolífera causando problemas devido ao acúmulo das substâncias que reduzem o diâmetro interno da tubulação provocando aumento da pressão e do consumo de energia [2, 3, 19, 21].

Observa-se que quando um sistema de transporte de fluido está em operação o processo de incrustação inicia-se imediatamente na tubulação em operação [19, 21].

Uma pergunta de interesse na indústria é “quando” e “quanto” de incrustação surgirá sob certas condições. Como os materiais incrustantes geralmente consistem de misturas de componentes altamente assimétricos, torna-se necessário estudar as interações entre os componentes da mistura como uma das possíveis causas principais [4]. O tipo e a quantidade de deposições de várias misturas fluídicas complexas varia dependendo dos componentes presentes nelas e das quantidades relativas de cada família de componentes que podem ser polidispersivos. Em função deste problema, torna-se necessário desenvolver técnicas analíticas para identificar e medir a precipitação em um processo de incrustação [3] e [6-9].

Diante dos problemas causados pela incrustação, algumas técnicas de detecção e monitoramento vem sendo desenvolvidas. Com a utilização da plataforma para detecção da incrustação pretende-se diminuir os custos com manutenção e agilizar os processos de monitoramento em sistemas com tubulações. A plataforma será utilizada para analisar o comportamento de substâncias líquidas em tubulações.

1.1 Objetivos

Com o este trabalho pretende-se:

- Estudar o processo de incrustação, principalmente na indústria petrolífera, como este processo ocorre e quais são suas conseqüências;
- Estudar as técnicas utilizadas para detecção do processo de incrustação e de processos relacionados, como corrosão;
- A partir das técnicas estudadas, observando as vantagens e desvantagens de cada técnica, desenvolver uma plataforma para detecção da incrustação e realizar testes utilizando a plataforma desenvolvida.

Com o desenvolvimento da plataforma para detecção da incrustação pretende-se reduzir a ocorrência de falhas em dutos que podem causar danos ao meio ambiente; evitar a perda da capacidade operacional dos sistemas de transporte de fluidos, aumentando a segurança; otimizar a mão de obra para instalação e rapidez na obtenção das informações sobre o processo de incrustação.

1.2 Sinopse dos capítulos

Esta dissertação é composta por seis capítulos, que são descritos individualmente a seguir:

- Neste capítulo é realizada uma introdução da dissertação, sendo apresentados os objetivos do trabalho.
- No Capítulo 2 são apresentadas as características gerais do processo de incrustação incluindo a origem deste processo, as causas e conseqüências provocadas, bem como os fatores que contribuem para o surgimento da incrustação.
- São apresentadas algumas técnicas para detecção da incrustação e de processos relacionados como a corrosão no Capítulo 3, e os métodos utilizados para detecção e monitoramento da incrustação são discutidos.

- No Capítulo 4 são apresentados os resultados de testes preliminares utilizando um equipamento de ultra-som para verificar a capacidade deste método na detecção da incrustação.
- No Capítulo 5 são apresentadas todas as etapas do projeto e do desenvolvimento da plataforma para detecção da incrustação, bem como os testes realizados para validação da plataforma e os resultados obtidos.
- As conclusões gerais em relação ao trabalho realizado e também as sugestões para trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 6.

Capítulo 2

Características gerais do processo de incrustação

2.1 Introdução

Quando algum fluido é transportado por tubulações, acumulam-se com o passar do tempo, materiais indesejados na parede interna dessas tubulações. Esses materiais indesejados 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 [5, 10]:

- **Sedimentação:** Este processo é provocado pela ação da força de 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.
- **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.
- 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.

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 [5]. Em tubulações metálicas, pode ocorrer o rompimento da estrutura em função da oxidação oriunda de reações químicas [6].

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 [5].

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 [4].

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, sólidos, cloretos, bactérias e ainda por parâmetros como velocidade de fluxo, regime de escoamento, pressão e temperatura que influenciam na formação da incrustação [4].

A limpeza dos dutos incrustados, realizada com o objetivo de remover as camadas acumuladas na superfície interna da tubulação e os 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 preditivas 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 [19].

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 [3, 9].

Três fatores podem ser considerados no desenvolvimento de mitigação e prevenção da incrustação [3]:

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 [1]. 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 [3, 11]. 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 [2]:

- 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 [3-4].

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 [2].

Com uma modelagem apropriada que considere as principais causas e mecanismos de incrustação, é possível prever a natureza da incrustação em cada caso e desenvolver técnicas de mitigação para combater este processo.

Os dados históricos da incrustação disponíveis podem ser úteis para testar os sistemas que são desenvolvidos. Considerando a diversidade de dados, as análises devem ser feitas com cuidado para qualquer conclusão de universalidade. Porém para fazer comparações entre dados de incrustações entre várias plantas e testar a validade dos sistemas desenvolvidos é necessário adquirir os dados de composições da alimentação em cada planta como também as características e as condições de operações do sistema de processo usados nessas plantas [2]. Só então pode-se testar a precisão dos modelos desenvolvidos e entender em quais casos existem ou não incrustação.

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 resolver estes problemas, ou seja, para modelá-los e predizê-los com precisão, é necessário entender os seus mecanismos claramente e as naturezas interativas dos fenômenos envolvidos. A primeira fase de estudo em qualquer modelagem de incrustação em um processo industrial é entender o mecanismo de tal incrustação. Um ou mais dos efeitos ou mecanismos podem ser responsáveis pela incrustação em alguns processos industriais [2].

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 [3]:

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 com a aplicação da teoria interfacial esta fase de incrustação para os processos industriais devem ser modelados.
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 [2].

2.3 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as características gerais do processo de incrustação, definindo como ocorre e quais são os problemas causados. Diante destes problemas, é necessário que algumas providências sejam tomadas para detecção e monitoramento da incrustação.

Capítulo 3

Técnicas de detecção da incrustação

3.1 Introdução

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:

- i) O cupom de perda de massa [12-15];
- ii) O sensor de resistividade elétrica [12] e [16-18];
- iii) Os métodos que utilizam ultra-som [19-34].

Estas técnicas são descritas a seguir.

3.2 Cupom de massa

O cupom é uma placa do mesmo material de que são fabricados os dutos que é instalada no interior da tubulação. Por ser do mesmo material dos dutos e está submetida às mesmas condições, o cupom sofre igualmente as eventuais oxidações, que deterioram a tubulação. O cupom é retirado tipicamente da tubulação em intervalos que variam de um a três 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. Considera-se que a taxa de corrosão verificada no cupom é a mesma do duto. O uso do cupom permite o controle da corrosão na tubulação ao avaliar a variação de sua massa em determinado período de tempo [12, 14].

A corrosão em dutos de aço, e seus componentes relacionados, é um processo contínuo. 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].

Na Figura 3.1 são ilustrados alguns tipos de cupons de perda de massa, estes cupons podem ter formas e tamanhos variados, além de possuírem composições diferentes.

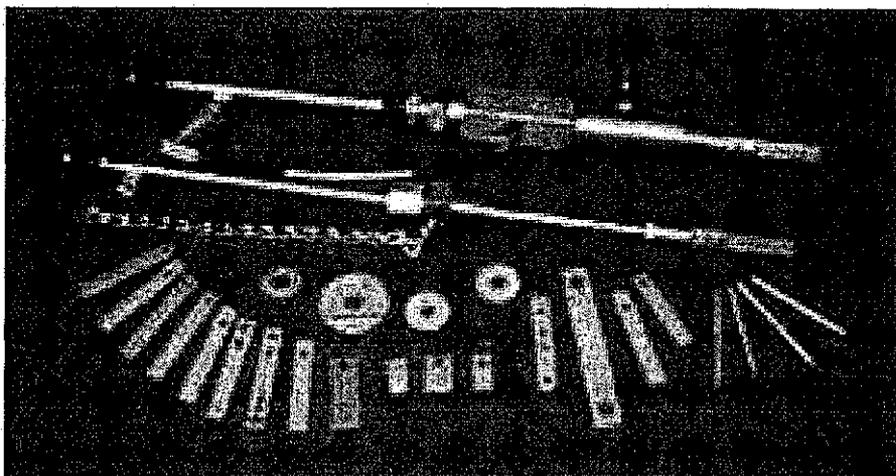


Figura 3.1: Tipos de cupons de perda de massa.

O cupom fornece uma indicação do estado de corrosão e permite analisar as condições e os tipos de sedimentos existentes no sistema de dutos, além de permitir a detecção de inibidores químicos na parede interna do duto, ou similarmente indicar se o inibidor recomendado é eficaz para prover proteção para um tipo de metal particular [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 [13].

Na Figura 3.2 é ilustrado um cupom de massa, antes e depois de ter sido exposto as condições do interior de uma tubulação. Quando a corrosão atinge o cupom, o mesmo se deteriora e com isso há uma redução em sua espessura.



Figura 3.2: Exemplo de um cupom, antes (a) e depois (b) de ser atingido pela corrosão.

A determinação da perda de massa utilizando cupons tem um número atrativo de características que são levadas em conta [14]:

- Simples: Não necessita de equipamentos sofisticados para obter os resultados;
- Direto: Uma medida direta é obtida com aproximações;
- Versátil: É aplicável em diversos tipos de ambientes corrosivos e fornece informações sobre os tipos de corrosão.

3.2.1 Requisitos para testes com cupons

Existem alguns requisitos que devem ser considerados para se aplicar o teste com o cupom [15]:

1. O histórico da tubulação e sua composição devem ser conhecidos, para determinar qual cupom de ser utilizado;
2. O cupom deve ser identificado, usualmente pelo número de código que identifica o seu tipo;
3. Dados sobre o teste específico do cupom devem ser registrados. Nos registros devem conter informações detalhadas sobre o cupom, como dimensões, peso inicial, condições da superfície, localização, condições e tempo de exposição;
4. Os cupons devem ser montados de modo que fiquem firmes e isolados de contatos com outros metais, para não sofrerem interferência dos metais já corroídos.

3.2.2 Avaliação do cupom após a exposição

Quando o cupom é retirado, observações do mesmo devem ser registradas, antes de limpá-lo. As amostras são limpas por vários meios para remoção de todos os sedimentos e produtos da corrosão do metal. Após a limpeza, o cupom é pesado novamente e a taxa de corrosão é calculada pela perda de massa utilizando a seguinte expressão (empírica) [15]:

$$C_C = \frac{mK}{DA_m t_C} \quad (3.1)$$

onde C_C é a taxa de corrosão utilizando o cupom, m é a perda de massa (g), K é um fator de conversão, D é a densidade do metal (g/cm^3), A_m é a área da superfície do metal (cm^2), t_C é o tempo de exposição (h).

O fator de conversão K pode ser utilizado para calcular a taxa de corrosão em várias unidades, como ilustrado na Tabela 3.1 [15]. Onde mils é igual a 0,001 polegadas.

Tabela 3.1: Fator de conversão para diversas unidades da taxa de corrosão.

Unidade desejada	Fator de conversão
mils/ano	$3,45 \times 10^6$
milímetros/ano	$8,76 \times 10^4$
polegadas/ano	$3,45 \times 10^3$
polegadas/mês	$2,87 \times 10^2$

O intervalo de testes mais comuns com cupons é um período de 30 a 90 dias. Este intervalo indica as taxas medidas, e os resultados devem ser questionados, em relação a valores muito altos ou muito baixos de corrosão [13].

Testes com cupons possuem custos baixos, são simples de realizar e permitem a avaliação simultânea de diversos materiais e variações destes materiais. Além de serem facilmente adaptados para avaliar tipos específicos de corrosão, como corrosões em fendas e corrosões galvânicas [15].

Algumas fontes de erros com cupons incluem [15]:

- Intervalo de tempo de testes muito longos ou muito curtos;
- Variação no intervalo de tempo entre testes sucessivos;
- Variações da temperatura do fluido;

- Uso de cupons de fabricantes diferentes;
- A textura da superfície do cupom;
- O uso de ligas diferentes nos cupons;
- Diferenças nos procedimentos de análise e manuseio com os cupons.

Algumas desvantagens de se utilizar o cupom são [15]:

- A medida da taxa de corrosão do duto é uma aproximação;
- Existe a necessidade de esperar por um período de um a três meses para se obter uma medida;
- O processo de transporte do fluido deve ser parado para instalar e retirar o cupom;
- Deve ser tomado muito cuidado nos procedimentos de análise para evitar erros.

O uso de cupons oferece boas condições de diagnóstico das informações sobre a taxa de corrosão, mas outros métodos devem ser usados para se ter uma comparação dos resultados, de forma que tais resultados possam ter uma maior credibilidade.

3.3 Sensor de resistividade elétrica

O sensor de resistividade elétrica implantado no interior do duto, contém uma resistência padrão conhecida. Se o material começa a oxidar, o sensor emite um sinal diferente da resistência padrão, pois a resistência do material oxidado não é igual à resistência do material sob condições normais. Ela oxida em contato com o meio ambiente no interior do duto, aumentando a resistência do material. O sensor de resistividade elétrica permite análises mais detalhadas, apresenta resposta imediata e possibilita intervenções mais rápidas em eventuais catástrofes porque o sensor está ligado a um sistema microprocessado que armazena as informações recolhidas, e estas são transferidas para um programa de computador que prepara uma curva representativa do desgaste na superfície do sensor [12].

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 [16]. Estes sensores permitem a determinação da incrustação sem que seja necessário remover

o sensor do local de medição, uma vez que estes sensores são inseridos dentro da tubulação em análise. Na Figura 3.3 são apresentados alguns tipos destes sensores. Eles podem ter tamanhos variados e possuem características distintas para diferentes tipos de aplicações.

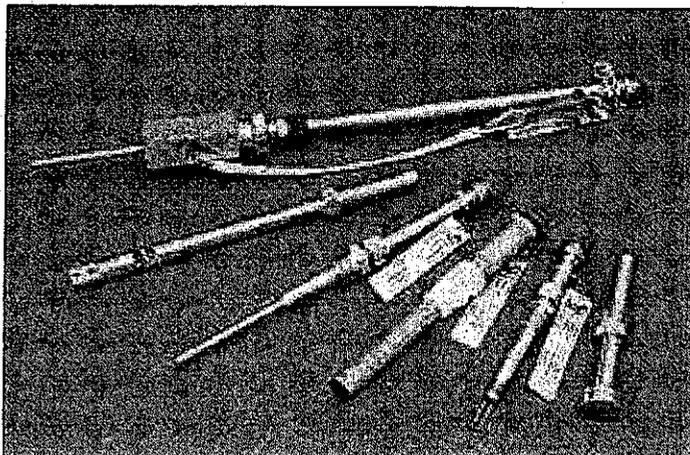


Figura 3.3: Tipos de sensores de resistência elétrica.

O princípio de operação destes sensores é baseado na mudança da resistência do elemento quando exposto a condições de corrosão. Se ocorrer a corrosão, as mudanças na resistência são proporcionais às mudanças de incremento da corrosão.

A técnica de resistência elétrica é um método invasivo, em que o sensor é colocado no interior da tubulação, e pode detectar a perda de metal em alguns equipamentos e estruturas. Esta técnica mede o efeito dos componentes mecânicos e eletroquímicos da corrosão, como erosão e cavitação [17].

Os sensores de resistência elétrica podem ser aplicados para detectar corrosão em diversos ambientes contendo gases, óleos e água. Exemplos de situações onde estes sensores são utilizados são [17]:

- Sistemas de transmissão e produção de óleo ou gás;
- Fluxo de processos em refinarias ou petroquímicas;
- Superfícies externas de dutos enterrados;
- Sistemas de fornecimento de água;
- Tubulações de gás.

Estes sensores podem ser permanentemente instalados para fornecerem informações contínuas, ou podem ser portáteis para recolherem dados periódicos.

3.3.1 Princípio de operação

A resistência elétrica de um elemento de metal ou uma liga é dada por [17]:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.2)$$

onde R é a resistência elétrica (Ω), ρ é a resistividade ($\Omega.m$), L é o comprimento do elemento (m), A é a área da seção transversal (m^2).

A redução (perda de metal) na seção transversal do elemento devido à corrosão é acompanhada por um incremento proporcional na resistência elétrica do elemento.

As medidas são obtidas utilizando um sensor de resistência elétrica com um elemento exposto ao fluido corrosivo e um elemento de referência lacrado no interior do sensor. Medidas da relação entre o elemento exposto e o elemento de referência são feitas para determinar a taxa de corrosão [17]. Uma estrutura do sensor de resistência elétrica é apresentado na Figura 3.4, com esta estrutura é medida a diferença entre a resistência exposta ao sensor e a uma resistência interna ao corpo do sensor.

Desde que mudanças na temperatura afetam a resistência tanto do elemento exposto quanto do elemento de referência igualmente, medindo a relação entre as resistências minimiza-se a influência na mudança da temperatura ambiente. Portanto, alguma mudança na relação entre as resistências é somente atribuída à perda no metal do elemento exposto, uma vez que a temperatura de equilíbrio é estabelecida [17].

Todos os sistemas de monitoração de corrosão com sensores de resistência elétrica possuem um terceiro elemento de teste. Devido o elemento de teste estar também no interior do sensor, a relação entre sua resistência e a resistência do elemento de referência permanece inalterada. Alguma mudança significativa nesta relação indica a perda da integridade do sensor [17].

Os dados monitorados continuamente por estes sensores são usualmente transmitidos para um computador e tratados para fornecer informações diretas sobre a taxa de corrosão. Técnicas gráficas são usadas para obter a taxa de corrosão através dos dados obtidos periodicamente, como ilustrado na Figura 3.5. Nesta figura é ilustrada a variação da resistência do sensor em função do tempo em que o mesmo está exposto ao fluido, e a partir destes dados é possível determinar a taxa de corrosão como será mostrado mais adiante.

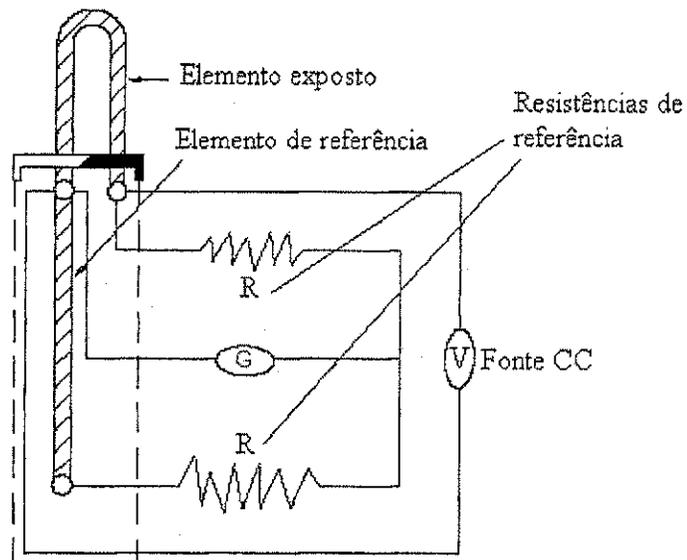


Figura 3.4: Estrutura de um sensor de resistência elétrica.

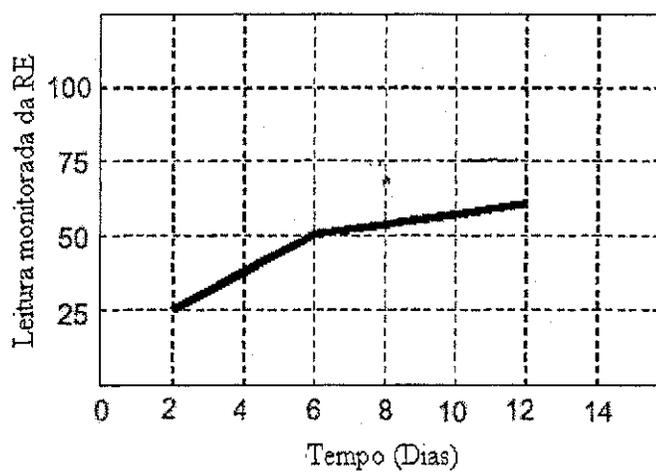


Figura 3.5: Gráfico da relação entre as leituras da resistência elétrica em função do tempo.

3.3.2 Tipos de sensores de resistência elétrica

Estes sensores possuem uma variedade de configurações geométricas, espessuras, materiais e ligas [17]. Alguns tipos de sensores de resistência elétrica são ilustrados na Figura 3.6. Tais sensores possuem características distintas como mostrado a seguir:

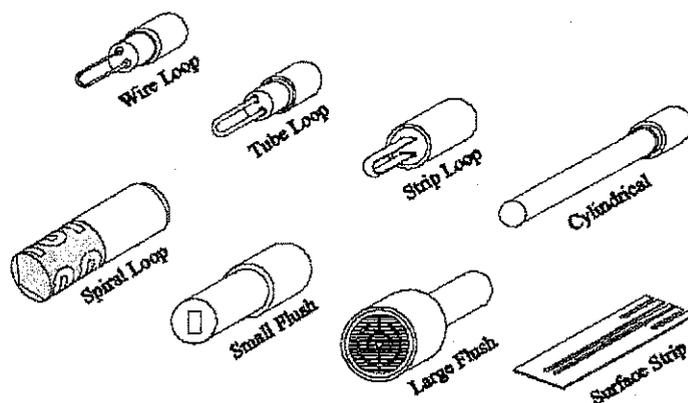


Figura 3.6: Tipos de geometrias dos sensores de resistência elétrica.

- Sensor *wire loop*: são os mais comuns e possuem uma alta sensibilidade, sendo uma boa alternativa para o monitoramento de instalações. As ligas utilizadas são de aço carbono ou aço inoxidável. Estes sensores possuem um defletor de fluxo (proteção de velocidade) para proteger o elemento de escombros flutuantes no sistema de dutos;
- Sensor *tube loop*: são recomendados quando uma alta sensibilidade é requisitada para detectar rapidamente pequenas taxas de corrosão. O aço carbono é a liga mais utilizada. Podem possuir um defletor de fluxo para minimizar possíveis distorções em um fluxo rápido no sistema de dutos;
- Sensor *strip loop*: são semelhantes aos sensores *wire loop* e *tube loop*. É um elemento muito sensível e muito frágil devendo ser utilizado somente em aplicações com fluxo muito baixo;
- Sensor *cylindrical*: são utilizados em ambientes severos com velocidade alta de fluxo e sistemas com temperaturas altas;
- Sensor *spiral loop*: são ideais para ambientes com fluxo alto. Sua resistência alta produz uma relação sinal-ruído alta, tornando o elemento muito sensível;

- Sensor *flush mount*: são muito eficazes na simulação das condições reais de corrosão ao longo do interior da superfície da parede do duto. Não é apropriado para sistemas com velocidade de fluxo alta;
- Sensor *surface strip*: são elementos retangulares finos com uma grande área de superfície para permitir resultados mais representativos em ambientes corrosivos não-homogêneos. São utilizados para monitorar superfícies externas de estruturas enterradas.

A escolha correta do tipo de sensor para uma certa aplicação requer um conhecimento prévio das condições em que o sensor será submetido [18].

Quando um tipo de sensor é selecionado para uma dada aplicação, os parâmetros chaves (além das restrições de pressão e temperatura) para a obtenção de bons resultados são o tempo de resposta e o tempo de duração do sensor. A espessura do elemento e a geometria determinam estes parâmetros. O tempo de resposta, definido como o tempo mínimo em que uma mudança mensurável aconteça, determina a velocidade com que os resultados úteis podem ser obtidos. O tempo de duração do sensor, ou tempo necessário para que a espessura efetiva do elemento exposto seja consumida, determina a escala de substituição do sensor [17].

3.3.3 Cálculo da taxa de corrosão

Quando a resistência elétrica do sensor é medida, o instrumento produz um sinal linearizado (S) que é proporcional à perda total de metal do elemento exposto (M). O valor numérico é uma função da espessura e geometria do elemento. No cálculo da perda do metal (M) estes fatores geométricos e dimensionais são incorporados em um fator multiplicador (P), e a perda do metal é dada por [17]:

$$M = \frac{SP}{1000} \quad (3.3)$$

Onde S e P são adimensionais, e a perda de metal é convencionalmente expressa em mils (0,001 polegadas), como um elemento de espessura.

A taxa de corrosão (C_R), utilizando o sensor de resistência elétrica é dada por [17]:

$$C_R = \frac{P365(S_2 - S_1)}{\Delta t_R} \quad (3.4)$$

Sendo Δt_R o tempo transcorrido em dias entre as leituras S_1 e S_2 .

Todos os sensores de resistência elétrica necessitam de um sistema de aquisição de dados para obtenção das informações sobre a taxa de corrosão monitorada, uma vez que as informações

são armazenadas em um computador para gerar as curvas representativas da relação entre as resistências externa e interna ao sensor em função do tempo de exposição [18].

Algumas desvantagens do uso do sensor de resistividade elétrica são [18]:

- Dissipação de potência;
- Ruídos de medição;
- Utilizado somente para medir corrosão;
- Dependência da utilização do sensor com relação a pressão do fluido.

3.4 Ultra-som

A detecção e quantificação precoce do processo incrustante podem reduzir os custos com bombas de sucção, reduzir os custos de manutenção e, conseqüentemente, reduzir os custos de produção. Observa-se que ao iniciar o transporte do produto começa-se, imediatamente, o processo de incrustação. Assim sendo o desempenho do fluxo diminui, continuamente com o tempo [19].

Muito embora, existam métodos disponíveis para amenizar este problema, a incrustação sempre estará presente. Isto representa para as indústrias, perda de energia e custos com manutenção [19].

3.4.1 Teoria sobre ultra-som

As ondas ultra-sônicas são aquelas com freqüência acima de 20 kHz geradas por ondas de pressão. Dois importantes parâmetros no estudo de ultra-som são velocidade e atenuação [20].

As propriedades da propagação de onda em meios materiais sólidos isotrópicos são comprimento de onda, freqüência e velocidade. O comprimento de onda é diretamente proporcional à velocidade da onda e inversamente proporcional à freqüência da onda. Esta relação é mostrada pela seguinte expressão [19]:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.5)$$

onde λ é o comprimento de onda (m), f é a freqüência (Hz) e v é a velocidade (m/s).

As ondas ultra-sônicas podem ser classificadas de acordo com a direção de propagação e a direção da perturbação em [19]:

- Ondas transversais: uma onda é dita transversal quando a perturbação for perpendicular à direção de propagação. No ar o som viaja por compressão e expansão (rarefação) das moléculas do ar na direção da propagação. Entretanto, em sólidos, as moléculas vibram em outras direções sendo, portanto possível um número de diferentes tipos de onda.
- Ondas longitudinais: se a perturbação for paralela à direção de propagação, tem-se uma onda longitudinal. Como exemplo: onda sonora.

A velocidade de uma onda longitudinal em um meio sólido está relacionada com as propriedades do meio material e é dada por [19]:

$$v_l = \sqrt{\frac{\sigma + 2\mu}{D}} \quad (3.6)$$

onde σ e μ são constante de Lamé (kg/ms^2) e D é a densidade (kg/m^3). As constantes de Lamé estão relacionadas com o módulo de elasticidade de Young e com a razão de Poisson por [19]:

$$\sigma = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.7)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.8)$$

onde E é o módulo de elasticidade de Young (kg/ms^2) e ν é a razão de Poisson (adimensional).

A velocidade da onda transversal em um meio sólido é dada por [19]:

$$v_T = \sqrt{\frac{\mu}{D}} \quad (3.9)$$

Para um meio líquido a rigidez é desprezível, não havendo, portanto onda transversal. A velocidade da onda longitudinal torna-se:

$$v_l = \sqrt{\frac{\beta}{D}} \quad (3.10)$$

onde β é o módulo volumétrico de um fluido (kg/ms^2).

As ondas transversais e longitudinais são as mais freqüentemente usadas em inspeções ultrassônicas. Entretanto, em superfícies e em *interfaces*, vários tipos de vibrações elípticas ou complexas são possíveis. Alguns desses modos de onda tais como Rayleigh e Lamb também são usados em inspeções ultra-sônicas [19].

As ondas Rayleigh viajam pela superfície de um material sólido relativamente grosso (quando a espessura do material é bem maior que o comprimento de onda) penetrando a uma profundidade de um comprimento de onda. Elas são usadas porque são muito sensíveis a defeitos de superfície, seguindo o contorno da superfície. As curvas em tubulações também podem ser inspecionadas com este tipo de onda, além de áreas em que outras ondas têm dificuldades de alcançar.

As ondas Lamb também conhecidas como ondas de chapa podem se propagar somente em materiais muito finos (quando a espessura do material é bem menor que o comprimento de onda). São ondas de vibração complexas que viajam ao longo de toda a espessura do material.

Para gerar as ondas ultra-sônicas citadas anteriormente, são utilizados transdutores ultra-sônicos. Os transdutores ultra-sônicos convertem energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Esses transdutores são feitos de materiais piezoelétricos, que são usados para gerar e receber ondas de pressão em meios líquidos e sólidos. Os cristais piezoelétricos deformam quando um potencial elétrico é aplicado sobre ele. Similarmente, quando o cristal é mecanicamente deformado, ele gera um campo elétrico.

O mesmo transdutor que emite o sinal ultra-sônico pode funcionar como detector, pois os ecos que voltam a ele produzem vibração no cristal, fazendo variar suas dimensões físicas que, por sua vez, acarretam o aparecimento de um campo elétrico. Esse campo gera sinais que podem ser amplificados e mostrados em um osciloscópio ou registrador [19].

Do ponto de vista experimental, pode-se usar onda ultra-sônica com incidência direta ou por reflexão. A transmissão por incidência direta usa um transdutor como transmissor e um segundo como receptor. O transmissor emite ondas de pressão, a qual é recebida pelo receptor e convertida em um sinal elétrico. A transmissão por incidência reflexiva utiliza um transdutor para trabalhar como transmissor e receptor [19]. Na Figura 3.7 estão ilustrados diagramas da transmissão direta e por reflexão com incidência normal. Observa-se que no caso da transmissão direta são utilizados dois transdutores, enquanto que na transmissão por reflexão utiliza-se apenas um que funciona como transmissor e receptor.

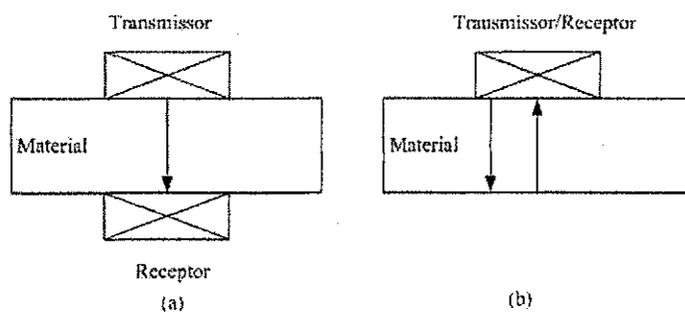


Figura 3.7: Diagrama da transmissão direta (a) e por reflexão (b) com incidência normal.

A transmissão por incidência normal é restrita a inspeção ponto a ponto apenas. As chamadas ondas guiadas, por outro lado podem ser usadas para inspecionar grandes áreas de um material de uma só vez [19].

A principal diferença entre a propagação da onda normal e a propagação da onda guiada é o fato que uma *interface* é necessária para a propagação das ondas guiadas. No interior da estrutura tem-se uma variedade de diferentes ondas refletindo e modos convertidos e superpondo-se

através de interferências construtivas e destrutivas que finalmente formam as ondas guiadas que percorrem a estrutura [20].

Para entender melhor sobre as ondas guiadas é importante conhecer um pouco de transmissão com incidência oblíqua. Na Figura 3.8 estão ilustrados diagramas utilizando este tipo de incidência. Onde Ts significa transmissão transversal e Tl transmissão longitudinal. Nesta figura são apresentadas a transmissão com incidência oblíqua direta que utiliza dois transdutores e com incidência oblíqua por reflexão que utiliza apenas um transdutor funcionando como transmissor e receptor.

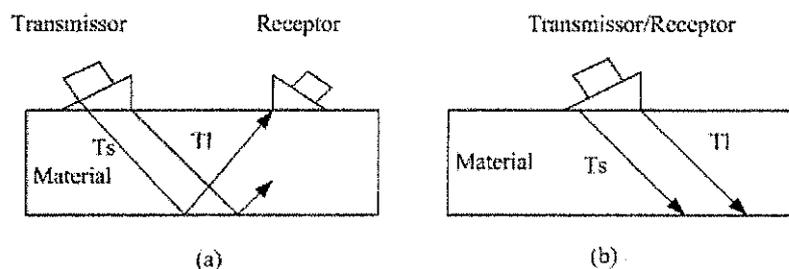


Figura 3.8: Diagrama da transmissão direta (a) e por reflexão (b) com incidência oblíqua.

De um modo geral, um feixe ultra-sônico com incidência normal está relacionado com o estudo de ondas longitudinais, ao passo que a incidência oblíqua está relacionada com o comportamento de ondas longitudinal, transversal e Rayleigh [19]. Duas leis governam o comportamento das ondas de pressão em meios sólidos:

- Lei da reflexão
- Lei de Snell

A lei da reflexão relaciona ângulo incidente com ângulo refletido para um determinado tipo de onda (longitudinal ou transversal). Por exemplo, o ângulo de incidência da onda longitudinal é igual ao ângulo de reflexão da mesma, mas não é igual ao ângulo de reflexão da onda transversal.

A lei de Snell relaciona a velocidade da onda incidente e o ângulo de incidência com a velocidade da onda transmitida e o ângulo de transmissão pela seguinte equação:

$$v_i \text{sen} \theta_t = v_t \text{sen} \theta_i \quad (3.11)$$

onde v_i é a velocidade da onda incidente (m/s), v_t é a velocidade da onda transmitida (m/s), $\text{sen}\theta_i$ é o seno do ângulo incidente e $\text{sen}\theta_t$ é o seno do ângulo de transmissão.

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 (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 [34].

3.4.2 Ondas guiadas

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. Estes métodos têm apresentado um potencial excelente para auxiliar na atualização das etapas de manutenção [21].

Para detecção, quantificação e localização da corrosão, trabalhos utilizando ondas guiadas têm mostrado grande sucesso [19-22]. A corrosão é indicada por um pulso adicional, um simples sinal de ruído ou uma mudança na velocidade de grupo. As ondas guiadas são criadas a partir de interferências entre as ondas transversais e ondas longitudinais. Esse processo ocorre quando a espessura de um material é menor ou igual ao comprimento de onda da onda ultra-sônica [19]. Na Figura 3.9 está esboçada a formação de ondas guiadas em um material em forma de chapa: quando a espessura da chapa decresce, as ondas transversal e longitudinal se interferem para formar ondas guiadas.

Quando uma onda guiada encontra uma *interface* diferente, ocorre uma fuga relacionada

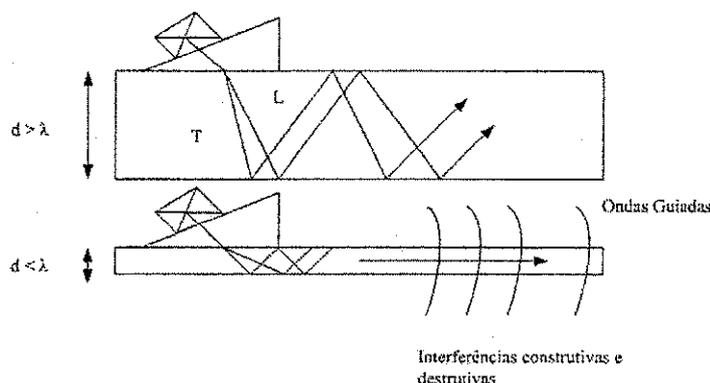


Figura 3.9: Geração de ondas guiadas a partir da interferência das ondas transversal e longitudinal.

com a quantidade de energia perdida, observada quando o material está em contato com o fluido. Com isso há uma diminuição na amplitude da onda ultra-sônica recebida [19].

O comportamento das ondas guiadas é entendido melhor pelo estudo das curvas de velocidade de fase e de grupo, que são obtidas por soluções numéricas para problemas de valores de contorno para ondas ultra-sônicas em meios sólidos [19].

A velocidade das ondas guiadas varia significativamente com a frequência da onda e com a geometria do meio. Além disso para uma dada frequência, a onda guiada pode se propagar em diferentes modos [23].

As curvas de dispersão consistem de um número infinito de modos de ondas guiadas. Estes modos relacionam a velocidade de grupo, ou a velocidade de propagação da onda guiada com a frequência da onda e a espessura do material. Assim, a velocidade de grupo é diretamente relacionada com a velocidade de fase, que é relacionada com o ângulo de incidência pela lei de Snell (conservação do momento):

$$v_{fase} = \frac{v_{acril}}{\text{sen}\theta_i} \quad (3.12)$$

onde v_{acril} é a velocidade do ultra-som no acrílico que é igual a $2,7 \times 10^3$ m/s.

As ondas longitudinal e transversal podem ser excitadas de diversas formas [24]. O deslocamento das partículas da onda longitudinal é paralelo a sua direção de propagação enquanto que o deslocamento das partículas da onda transversal é perpendicular à direção de propagação como ilustrado na Figura 3.10. Nesta figura são ilustradas as direções de propagação das ondas longitudinais e transversais, além de uma representação de incrustações presentes no interior do duto.

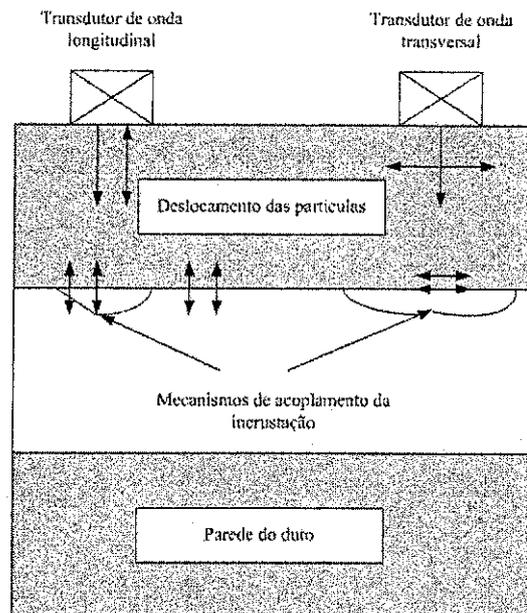


Figura 3.10: Deslocamento das partículas para ondas longitudinal e transversal.

Uma prática comum é o uso da técnica de pulso-eco para medir a atenuação e o modo de propagação. No duto, isto é acompanhado pelo registro das reflexões consecutivas no interior do mesmo e usando estes dados para determinar o coeficiente de atenuação do material usando a seguinte expressão [21]:

$$V = V_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad (3.13)$$

onde x é a distância percorrida (m), α é o coeficiente de atenuação (dB/m), V_0 é a amplitude inicial da onda (V), V é a amplitude final da onda (V).

Essa técnica fornece um diagnóstico qualitativo sobre as condições de incrustação formada. Medidas precisas da incrustação são difíceis devido às camadas incrustantes não serem uniformes e as suas propriedades variam ao longo dos materiais [21].

3.4.3 Ondas guiadas em dutos

O duto comumente usado no transporte de produtos é um guia de ondas natural que pode dar suporte a diferentes tipos de modos de ondas guiadas [20-21] e [25]. Estas ondas podem se propagar axialmente e circunferencialmente.

As ondas guiadas longitudinal, torsional e flexural são três modos inerentes ao tubo, viajando na direção axial. Estes modos podem ser caracterizados parcialmente pelos seus campos de deslocamento através da espessura da parede do tubo. O campo de deslocamento longitudinal tem componentes radial e axial. O campo de deslocamento torsional tem componente angular apenas, enquanto que o campo de deslocamento flexural tem componentes radial, axial e angular [21].

Para detectar incrustação é necessário usar um modo que seja capaz de distinguir materiais líquido, viscoso ou películas de sólidos no interior da tubulação. As ondas transversais, circunferencial e torcional são as mais indicadas, pois suas partículas de deslocamento são perpendiculares à direção de propagação da onda permitindo a detecção da incrustação na superfície interior do duto. Muito embora tubos possam ser inspecionados com esses três modos, a implementação prática torna-se difícil para aplicações em tubulações em larga escala. A técnica de onda de massa (onda percorrida em espaço ilimitado), é uma técnica ponto a ponto em que apenas a área de baixo do transdutor é investigada. Assim, o transdutor deve ser deslocado manualmente ou automaticamente ao redor da circunferência e axialmente para obter informações detalhadas do grau de incrustação. Entretanto, a eficiência pode ser melhorada usando a técnica de onda circunferencial guiada (onda percorrida em espaço limitado), uma vez que no interior do tubo pode-se inspecionar a incrustação a partir de uma única posição. Neste caso, ainda é necessário o movimento do transdutor na direção axial uma vez que a área circunferencial ao redor do transdutor deve ser inspecionada. A técnica de onda longitudinal aumenta significativamente a eficiência na monitoração, fazendo com que os modos que se propagam axialmente se propaguem com bastante energia, podendo desta forma inspecionar grandes distâncias ao longo da tubulação. Portanto, vários metros podem ser inspecionados usando dois transdutores [21]. Na Figura 3.11 estão ilustrados o uso da onda guiada circunferencial com apenas um transdutor funcionando como transmissor e receptor, além do uso da ondas guiadas longitudinais utilizando dois transdutores. Em ambos os casos a presença de uma *interface* diferente provoca uma fuga de energia e conseqüentemente uma redução na amplitude do sinal recebido.

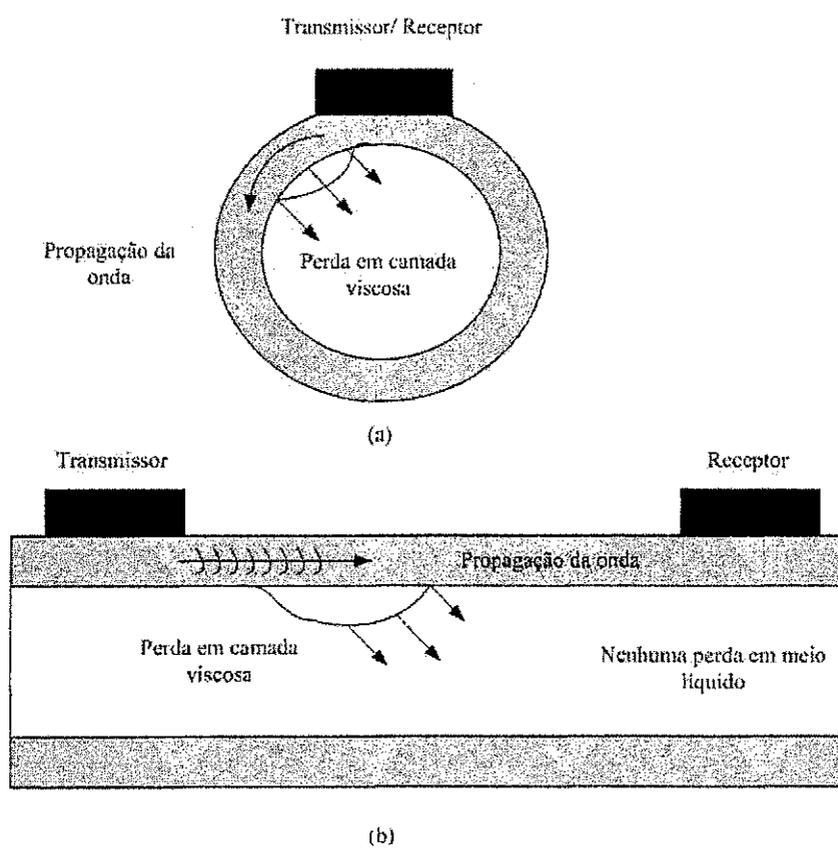


Figura 3.11: Detecção de incrustação com ondas guiadas cicunferencial (a) e longitudinal (b).

3.4.4 Sensores usados para gerar ondas guiadas

Os três principais tipos de sensores usados para gerar ondas guiadas são [21]:

1. Transdutores com feixes angulares: Estes transdutores usam cunhas de ângulos fixos ou variáveis onde o usuário determina o ângulo de incidência e de refração. São usados para introduzir ondas transversais refratadas no material sob teste [26]. A trajetória angular sonora permite que o feixe sonoro seja refletido de *interfaces* no interior da estrutura sob inspeção para melhorar a detectabilidade de falhas. São também usados para gerar ondas de superfície para detectar defeitos superficiais. Sua principal desvantagem é que trabalha com muitas *interfaces* causando perdas de energia.
2. Transdutores comb: Estes transdutores são caracterizados pelas larguras dos dentes, pelo número de dentes e pelos espaçamentos entre eles. Ajustando o espaçamento entre os dentes consegue-se gerar alguns tipos de modos de propagação no duto. O número de dentes controla a largura de banda do espectro da velocidade de fase. Possuem altas frequências de excitação aumentando a sensibilidade e resolução. São um pouco mais eficientes que o anterior no que diz respeito a perdas por acoplamento pois apresentam menos perdas nas *interfaces*.
3. Transdutores acústicos eletromagnéticos (EMATs): Enquanto os dois transdutores anteriores requerem acoplamento e contato com a estrutura, estes não necessitam. Os EMATs podem gerar ondas guiadas longitudinais, flexural e torsional em tubos [27], podendo desta forma, simplificar o processo de inspeção. Possuem maior resolução e sensibilidade que os sensores citados anteriormente. A desvantagem dos EMATs é que consomem muita energia e acumulam campos magnéticos no meio ambiente.

Na Figura 3.12 são ilustrados exemplos de sensores EMATs, com feixes angulares e combs.

Em locais de difícil acesso onde a tubulação está encoberta com concreto ou a tubulação atravessa um rio, a inspeção pode ser feita de um único local e vários metros de tubo podem ser inspecionados. Um sensor do tipo comb é normalmente usado neste tipo de operação porque ele envolve totalmente a tubulação. Ajustando o espaçamento entre os elementos (dentes) do sensor e a frequência de excitação, permite uma seleção adequada do modo da onda guiada para uma geometria particular [21].

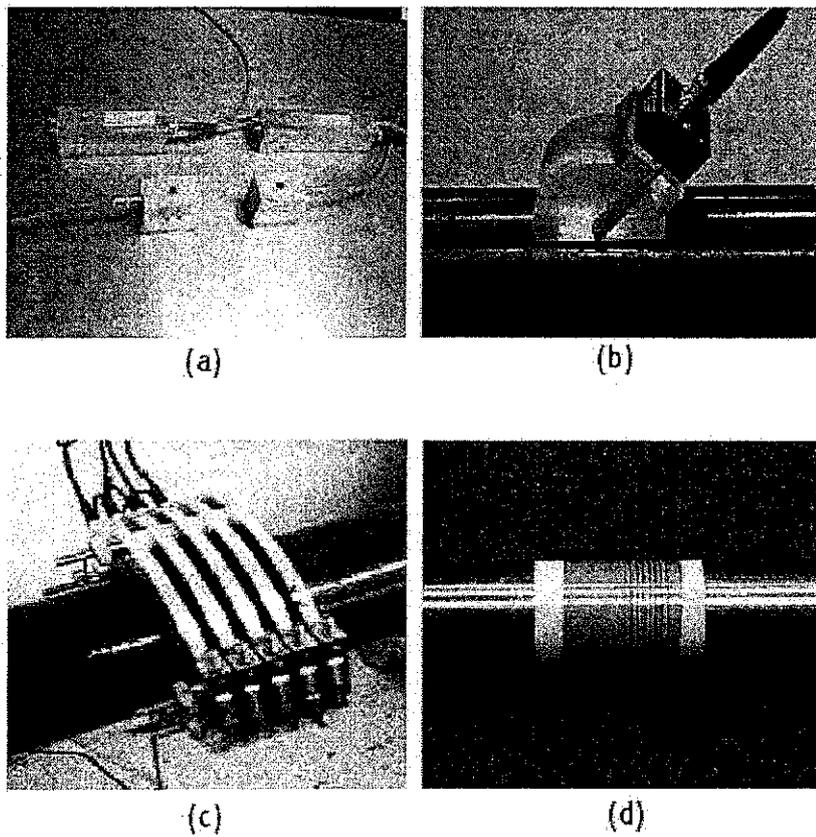


Figura 3.12: Sensores usados em ondas guiadas: Transdutor EMAT (a), transdutor com feixes angulares (b) e transdutores comb (c) e (d).

3.4.5 Método do impacto acústico

Este método utiliza um dispositivo mecânico de impacto, como o toque de um martelo ou moeda, para gerar uma onda sônica ou ultra-sônica no material [19]. Um esboço que ilustra este método é apresentado na Figura 3.13.

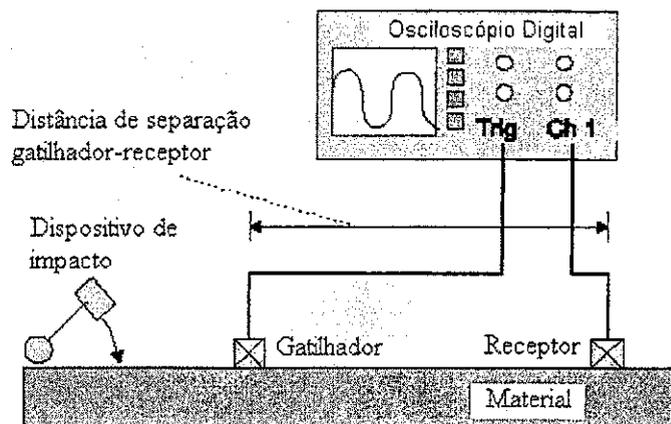


Figura 3.13: Esboço do método de impacto acústico.

Neste método um sensor ultra-sônico atua como um gatilhador para o dispositivo de aquisição de dados, usualmente um osciloscópio, e o outro sensor recebe o ultra-som ou energia acústica e transfere o sinal para o *display* do equipamento. A forma de onda percorre o comprimento do duto e encontra primeiro o sensor gatilhador, onde o gatilho (*trigger*) do osciloscópio é ativado. O segundo sensor é então utilizado para observação da forma de onda. Com isso é observada a amplitude do sinal gerado. A melhor indicação da existência da corrosão utilizando este método é a velocidade, que diminui de forma significativa para um duto corroído [19]. A velocidade pode ser obtida pela determinação da frequência e do comprimento de onda através do osciloscópio e utilizando a expressão (3.5).

Características gerais

O toque da moeda é uma das formas mais antigas de testes não-destrutivos baseado na propagação das ondas de pressão. A propagação das ondas de pressão em um sólido é afetada diretamente pelas propriedades mecânicas do material. Este é um método subjetivo,

que depende da experiência do operador, e é limitado pela detecção de defeitos próximos da superfície[28].

Nos testes não-destrutivos em metais, a técnica de pulso-eco ultra-sônico é um método capaz de detectar falhas e outros defeitos internos. Um transdutor eletromecânico é usado para gerar pulsos de curta duração que se propagam no objeto sob inspeção. A reflexão destes pulsos ocorre na separação entre os contornos dos materiais com densidades e propriedades elásticas diferentes. Os pulsos refletidos passam pelo transdutor que funciona também como um receptor. O sinal recebido é mostrado em um osciloscópio, e a duração de tempo do pulso é medida eletronicamente. Conhecendo a velocidade da onda de pressão, a distância para a interface refletida pode ser determinada.

Quando uma perturbação é aplicada repentinamente em um ponto da superfície em um sólido, como um impacto, a perturbação se propaga pelo sólido com três tipos diferentes de onda de pressão [28]: onda-P (onda longitudinal), onda-S (onda transversal) e onda-R (onda Rayleigh). Na Figura 3.14 são ilustrados estes tipos de ondas.

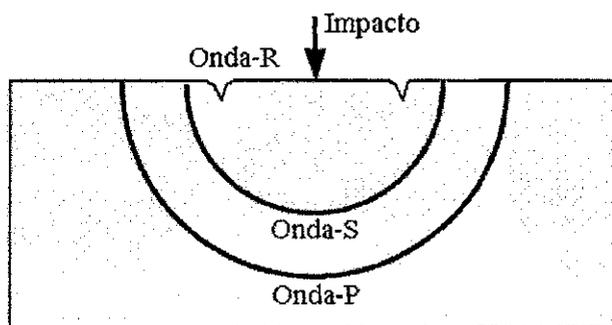


Figura 3.14: Ondas de pressão causadas pelo impacto na superfície de uma placa.

A onda-P e a onda-S se propagam no sólido ao longo das frentes de ondas esféricas. A onda-P é associada com a propagação de ondas longitudinais e a onda-S é associada com as ondas transversais. Além disso, existe a onda-R em que a perturbação percorre ao longo da superfície a partir do ponto de impacto.

Em um meio sólido elástico e isotrópico, a velocidade da onda-P é relacionada com o módulo de elasticidade de Young, com a taxa de Poisson e com a densidade, de acordo com a expressão [31]:

$$v_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{D(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3.14)$$

onde v_P é a velocidade da onda-P (m/s), E é o módulo de elasticidade de Young (kg/ms^2), ν é a taxa de Poisson (adimensional) e D é a densidade (kg/m^3).

A onda-S se propaga com uma velocidade menor, v_S (m/s), dada por [28]:

$$v_S = \sqrt{\frac{\mu}{D}} = \sqrt{\frac{E}{D2(1+\nu)}} \quad (3.15)$$

onde μ é a constante de Lamé (kg/ms^2).

A relação entre as velocidades da onda-S e da onda-P depende da razão de Poisson, e é dada pela seguinte expressão [28]:

$$\frac{v_S}{v_P} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (3.16)$$

A relação entre a velocidade da onda-R, v_R (m/s), e a velocidade da onda-S são dadas pela seguinte expressão aproximada [28]:

$$\frac{v_R}{v_S} = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad (3.17)$$

Quando uma onda de pressão percorrendo um material 1 é incidente em uma *interface* com um material 2 diferente, uma porção da onda incidente é refletida. A amplitude da reflexão é uma função do ângulo de incidência, e é máxima quando o ângulo é 90° (incidência normal). Para a incidência normal o coeficiente de reflexão, \mathfrak{R} , é dado pela expressão [28]:

$$\mathfrak{R} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.18)$$

onde Z_2 é a impedância acústica específica do material 2 ($kg/m^2.s$) e Z_1 é a impedância acústica específica do material 1 ($kg/m^2.s$).

A impedância acústica específica é o produto da velocidade da onda e a densidade do material. Valores aproximados de Z (impedância acústica) para alguns tipos de materiais são apresentados na Tabela 3.2 [28].

Quando uma onda de pressão percorrendo o aço encontra uma *interface* com o ar, existe uma reflexão quase total na *interface*. Os métodos não-destrutivos baseados na propagação de ondas de pressão têm tido grande sucesso na localização de defeitos em sólidos [28].

Tabela 3.2: Valores de impedância acústica.

Material	Impedância acústica específica ($kg/m^2.s$)
ar	0,4
água	$0,5 \times 10^6$
solo	$0,3 \text{ à } 4 \times 10^6$
concreto	$7 \text{ à } 10 \times 10^6$
aço	47×10^6

O coeficiente de reflexão dado pela expressão (3.18) pode ser negativo ou positivo dependendo dos valores relativos das impedâncias acústicas dos materiais.

Método do impacto-eco

Os métodos de ondas de pressão para detecção de falhas utilizam o impacto mecânico para gerar pulsos de pressão. O impacto produz um pulso de alta energia que pode penetrar no material sob inspeção [28].

Na Figura 3.15 é apresentado um esquema do teste de impacto-eco em uma placa com ar sob a superfície. O impacto na superfície produz ondas-P e ondas-S que percorrem a placa, e a onda de superfície (onda-R) que percorre a superfície a partir do ponto de impacto.

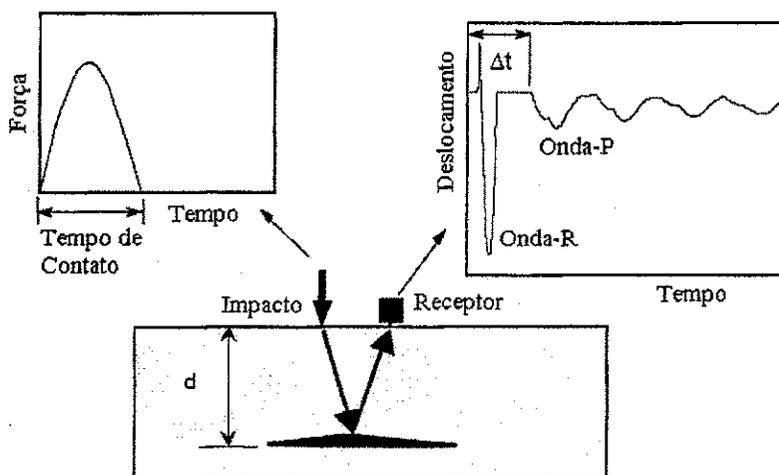


Figura 3.15: Esquema do método do impacto-eco.

As ondas P e S são refletidas nas falhas internas (diferenças na impedância acústica) ou

contornos externos. Quando as ondas refletidas, ou ecos, retornam para a superfície, elas produzem deslocamentos que são medidos por um transdutor receptor. Se o transdutor é colocado próximo do ponto de impacto a resposta é dominada por ecos de ondas-P [29].

O grande deslocamento (depressão) no início da forma de onda, como apresentado na Figura 3.15, é causado pela onda-R, e a série de deslocamentos seguintes, de menor amplitude, são causados pela onda-P com múltiplas reflexões entre as superfícies.

A análise no domínio do tempo é utilizada inicialmente para determinar o tempo entre o início do impacto e o retorno dos ecos das ondas-P [28] e [30]. Este processo necessita identificar o tempo de retorno das ondas-P.

Outro princípio utilizado é o da análise de frequência, que é ilustrado na Figura 3.16.

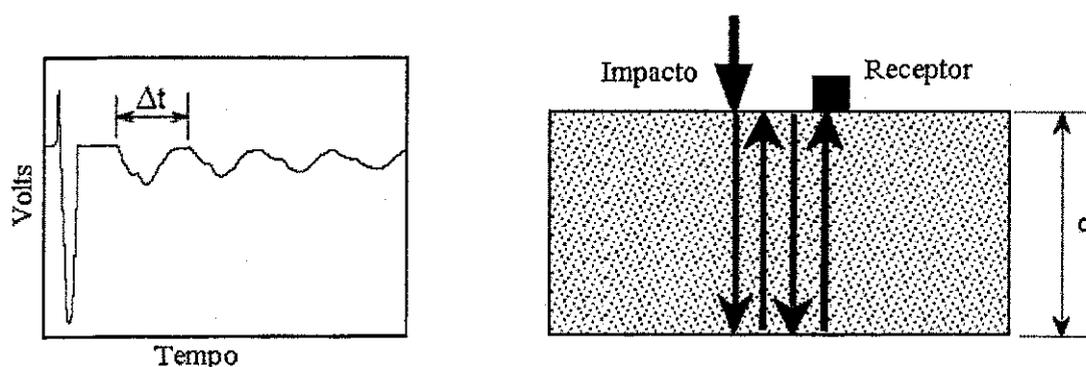


Figura 3.16: Princípio da análise de frequência.

Na figura 3.16 a onda-P produzida pelo impacto produz múltiplas reflexões entre a superfície em teste e a *interface* refletida. Cada intervalo de tempo de retorno da onda-P para a superfície em teste, causa um deslocamento característico. Assim a forma de onda tem um perfil periódico que depende da distância percorrida pela onda-P do início do impacto até a *interface* refletida. Se o receptor é colocado próximo do ponto de impacto, a distância de ida e volta é $2d$, onde d é a distância entre a superfície em teste e a *interface* refletida. O intervalo de tempo entre os retornos sucessivos para múltiplas reflexões da onda-P é igual a distância percorrida dividida pela velocidade da onda de acordo com a expressão [28]:

$$\Delta t = \frac{2d}{v_{PP}} \quad (3.19)$$

onde Δt é o intervalo de tempo de retorno da onda-P, d é a distância para a *interface* refletida (m) e v_{PP} é a velocidade da onda-P através da espessura da placa (m/s).

A frequência, f , da onda-P retornada é o inverso do intervalo de tempo, e é dada pela relação aproximada [28]:

$$f = \frac{v_{PP}}{2d} \quad (3.20)$$

onde v_{PP} é a velocidade da onda-P através da espessura da placa (m/s) e d é a distância para a *interface* refletida (m).

Se o objeto em teste é uma placa sólida, a frequência calculada de acordo com a expressão (3.20) é chamada de frequência de espessura da placa.

A expressão (3.20) é uma relação básica para interpretação dos resultados com testes de impacto-eco. Estudos detalhados mostram que a velocidade da onda aparente para a frequência de espessura da placa é aproximadamente 96 % da velocidade da onda-P, isto é, $v_{PP} = 0,96v_P$ [31]. A diferença ocorre devido às múltiplas reflexões da onda-P excitarem um modo particular de vibração na placa - o modo de espessura - e os deslocamentos causados por este modo produzem um perfil periódico na forma de onda [28].

Na análise de frequência dos resultados do impacto-eco, o objetivo é determinar as frequências dominantes na forma de onda analisada. Isto é acompanhado pelo uso da técnica da transformada rápida de Fourier para transformar a forma de onda obtida para o domínio da frequência [28]. O resultado da transformação é um espectro de amplitude que mostra a amplitude das várias frequências contidas na forma de onda. Para estruturas como placas, a frequência de espessura tem usualmente um pico dominante no espectro. O valor do pico de frequência no espectro de amplitude pode ser usado para determinar a profundidade da *interface* refletida por meio da expressão (3.20) [28].

Na Figura 3.17 são ilustradas curvas de frequência para testes com impacto-eco. Na Figura 3.17(a) é ilustrado o espectro para um teste em uma placa sólida com espessura de 1,0 *cm*. Existe um pico na frequência de 3,42 *kHz*, que corresponde as reflexões múltiplas da onda-P entre o topo e a parte inferior da placa. Usando a expressão (3.20) e resolvendo para v_{PP} , a velocidade da onda-P pode ser calculada. Na Figura 3.17(b) é ilustrado o espectro para um teste em uma placa sólida com espessura de 1,0 *cm* com uma falha à 0,5 *cm* do topo. O pico em 7,32 *kHz* é resultado das reflexões múltiplas entre o topo e a *interface* da falha. Usando a expressão (3.20) pode-se calcular a profundidade da falha e comparar com o valor já conhecido.

A realização do teste com o impacto-eco necessita de três componentes básicos [28]:

1. Um dispositivo de impacto capaz de produzir um impacto de curta duração;

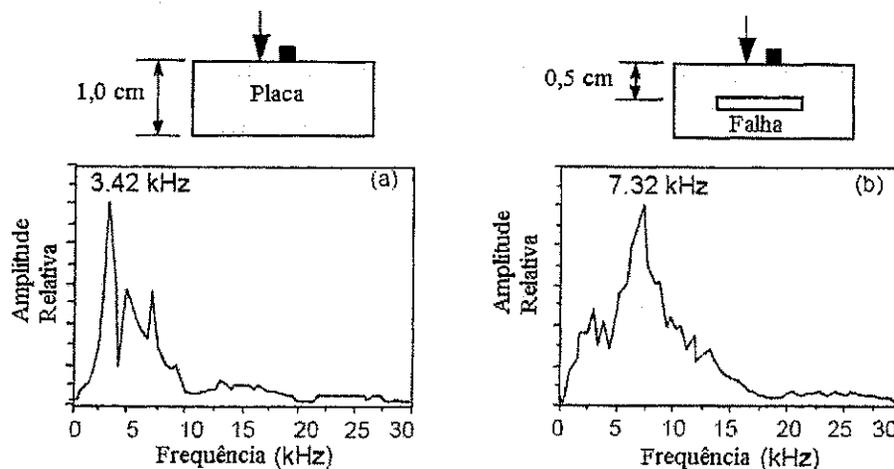


Figura 3.17: Exemplos de espectros de amplitude.

2. Um receptor de alta precisão para medir a resposta da superfície;
3. Um sistema de aquisição de dados para captar, processar e armazenar a forma de onda da superfície;

Uma bola de aço presa a um bastão é uma fonte de impacto conveniente, pois a duração do impacto é proporcional ao diâmetro da bola [28].

O transdutor é composto por um pequeno elemento piezoelétrico acoplado a um elemento principal. O deslocamento do transdutor simplifica a interpretação dos sinais. O transdutor não pode ter uma frequência ressonante igual a frequência de espessura que pode ser encontrada durante os testes. Para aumentar a precisão das medidas na superfície, o transdutor deve ser bem acoplado a mesma, e para isto utilizam-se certos acoplantes [28].

Ao acoplar o transdutor sobre a peça a ser inspecionada, imediatamente estabelece-se uma camada de ar entre a sapata do transdutor e a superfície da peça. Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça em razão das características acústicas (impedância acústica) serem diferentes do material a inspecionar. Como exemplo, podemos citar que na interface água e aço, apenas transmite 12% e reflete 88% da energia ultra-sônica. Por esta razão, deve-se usar um líquido que estabeleça uma redução desta diferença e permita a passagem das vibrações para a peça. Tais líquidos, denominados líquidos acoplantes são escolhidos em função do acabamento superficial da peça, condições técnicas e tipo da peça. Na Tabela 3.3 são apresentadas características de alguns acoplantes mais utilizados. Os acoplantes devem ser selecionados em função da rugosidade da superfície

da área de varredura, do tipo de material, da forma da peça, dimensões da área de varredura e posição para inspeção. Os acoplantes são utilizados para evitar o espalhamento do sinal transmitido através do ar [34].

Tabela 3.3: Tipos de acoplantes e suas propriedades.

Acoplante	Densidade (g/cm^3)	Velocidade longitudinal (m/s)	Impedância acústica ($g/cm^2.s$)
Óleo	0,9	1700	$1,5 \times 10^5$
Água	1	1480	$1,48 \times 10^5$
Glicerina	1,26	1920	$2,4 \times 10^5$
CarboxM Celulose	1,2	2300	$2,76 \times 10^5$

A distância entre o ponto de impacto e o transdutor também é importante, pois se a distância é muito grande, a resposta não é dominada pelas ondas-P refletidas, e a relação simples dada pela expressão (3.20) não pode ser aplicada. Se a distância é muito pequena, a resposta é dominada pelas ondas de superfície. Instrumentos modernos de impacto-eco são baseados em computadores portáteis com cartões de aquisição de dados e programas dedicados.

A duração do impacto é crítica para o sucesso do teste do impacto-eco. A idéia básica do teste com o impacto-eco é criar uma vibração ressonante correspondente ao modo de espessura. Para excitar o modo de espessura, o pulso de entrada deve ter uma componente fundamental da frequência [28].

A relação força-tempo para o impacto deve ser aproximadamente meio ciclo de uma curva seno, e a duração do impacto é igual ao tempo de contato.

O tempo de contato no teste de impacto-eco pode ser estimado pela medida do comprimento da “depressão” inicial da forma de onda no domínio do tempo, que corresponde ao comprimento da onda-R [29].

Uma questão comum sobre o método do impacto-eco é: “Qual é a menor falha que pode ser detectada?”. A resposta não é simples, pois existem vários fatores, que afetam a capacidade para detectar uma falha, entre esses fatores temos [28]:

- O tipo de falha e sua orientação;
- A profundidade da falha;
- O tempo de contato do impacto.

Além disso é necessário distinguir entre a capacidade para detectar a presença da falha e determinar a sua profundidade. A presença de pequenas falhas afeta a resposta da frequência de espessura, por uma redução do seu valor [28]. Assim uma redução da frequência de espessura é um indicador de que a falha está presente.

O desenvolvimento de um método de teste padrão para detecção de falhas usando o impacto-eco é difícil, pois muitas variáveis estão presentes nos testes. Os tipos de defeitos podem ser de uma grande variedade.

Dois métodos utilizando o impacto-eco podem ser utilizados [28], como ilustrado na Figura 3.18:

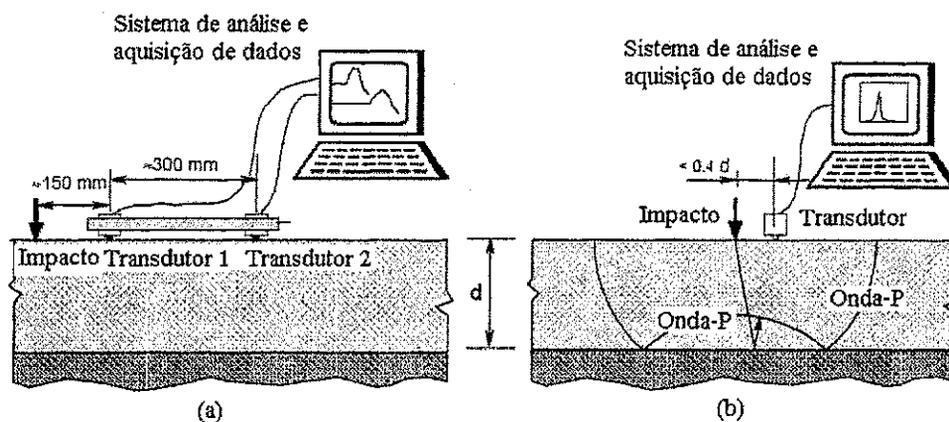


Figura 3.18: Métodos utilizados com o impacto-eco.

1. O primeiro método (a), é usado para medir a velocidade da onda-P. Este método é baseado na medida do tempo de percurso da onda-P entre dois transdutores separados por uma distância conhecida.
2. O segundo método (b), determina a frequência de espessura usando o método do impacto-eco, de forma que a espessura da placa é calculada usando a velocidade da onda-P e a expressão (3.20).

A velocidade da onda-P obtida pelo primeiro método é multiplicada por 0,96 quando a expressão (3.20) é utilizada. O procedimento de análise dos dados considera os erros sistemáticos associados com a natureza digital dos dados nos dois métodos. A espessura é determinada com uma incerteza que é associada ao intervalo de amostragem no primeiro método, e a duração do sinal obtido no segundo método [32-33].

3.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas algumas técnicas utilizadas para detecção e monitoramento da incrustação e da corrosão, que está relacionada com a incrustação. Os métodos utilizados foram analisados e as formas de detecção e monitoramento foram apresentadas.

Capítulo 4

Testes preliminares utilizando um aparelho de ultra-som

4.1 Introdução

Entre as técnicas utilizadas para detecção e monitoramento da incrustação e corrosão, optou-se por realizar testes utilizando as técnicas de ultra-som devido as suas vantagens e além de ser uma técnica não invasiva. O método que utiliza ondas guiadas foi o escolhido para realização dos testes preliminares para verificar a capacidade deste método na detecção da incrustação.

Para verificar a capacidade de detecção da incrustação utilizando ondas guiadas ultra-sônicas foi realizada uma montagem utilizando um equipamento de ultra-som (SONIC Instruments) com frequência de excitação de 1 *MHz* a 10 *MHz* [38], dois transdutores de ultra-som, cunhas para fornecer os ângulos de inclinação para os transdutores e um tubo de ferro galvanizado com diâmetro de 2 polegadas e espessura de 3 *mm*.

O equipamento ultra-sônico para detecção de falhas e espessuras modelo FTS mark I (Sonic instruments) é utilizado em ensaios não destrutivos para detecção de falhas e medição de espessura em materiais metálicos e não metálicos. O instrumento utiliza os princípios dos testes com ultra-som para detectar, localizar e avaliar defeitos como fissuras, porosidade, deterioração, corrosão e outras inclusões no material sob teste. Ele também é utilizado para medição de espessura de materiais e para determinação da localização do defeito nos objetos sob teste. Pela medição das propriedades de transmissão e atenuação, o equipamento pode ser usado como ajuda para determinar certas características físicas e metálicas dos materiais. O equipamento pode funcionar no modo pulso-eco ou no modo com dois transdutores (um transmissor e um receptor). Ele é capaz de desempenhar testes com contato direto ou testes com imersão e

também pode ser usado com transdutores simples ou duplos e as informações são apresentadas em um *display*. O equipamento gera vibrações ultra-sônicas e envia estas vibrações através do objeto sob teste. Se alguma descontinuidade é encontrada, o pulso é refletido e retorna para o equipamento. O tempo necessário para o pulso inicial percorrer o material e subseqüentemente retornar como um eco para o equipamento é interpretado como uma medida de espessura ou como a distância percorrida pelo pulso [38]. Na Figura 4.1 está ilustrada uma fotografia do equipamento de ultra-som utilizado.

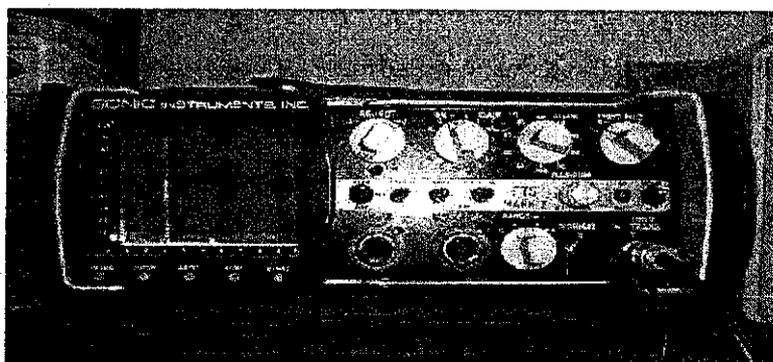


Figura 4.1: Fotografia do equipamento de ultra-som utilizado.

Nos testes foi utilizado um acoplante (carbogel) entre o transdutor e a superfície do tubo, pois os testes de contato utilizando ultra-som não podem funcionar sem um acoplante adequado entre o transdutor e o material sob teste. O acoplante deve ser líquido, semilíquido ou pastoso e deve possuir as seguintes características [39]:

- Fornecer um bom acoplamento acústico para a realização dos testes;
- Evitar a presença de ar entre a superfície do material sob teste e a face do transdutor;
- Ser de fácil aplicação;
- Não sair da superfície do material rapidamente;
- Fornecer uma lubrificação adequada;
- Ser homogêneo e livre de partículas sólidas;
- Estar livre de contaminantes (chumbo ou enxofre) e não ser corrosivo, tóxico ou inflamável;
- Não congelar ou evaporar sob condições de testes;

- Ser fácil de remover após a conclusão dos testes.

Alguns tipos de acoplantes mais utilizados em ensaios ultra-sônicos são: água, óleos, graxas, glicerina e resinas.

4.2 Testes realizados

A montagem realizada para os testes iniciais está ilustrada na Figura 4.2. Nesta montagem pode-se observar o equipamento de ultra-som (a), o tubo (b) e os transdutores acoplados (c).

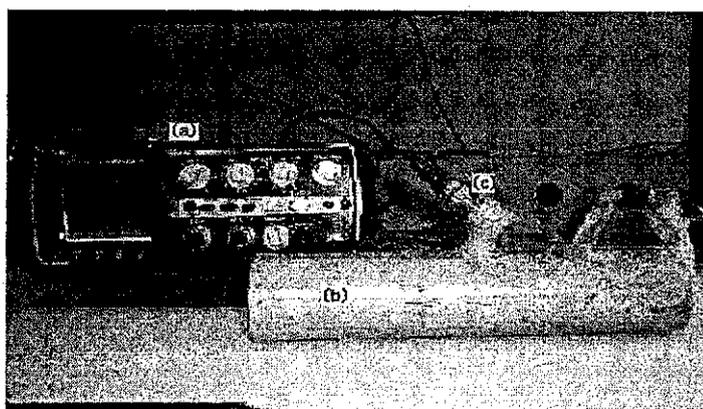


Figura 4.2: Fotografia da montagem utilizando um equipamento de ultra-som.

Na Figura 4.3 é ilustrado com mais detalhe o acoplamento entre os transdutores, as cunhas e o tubo. Esta estrutura é utilizada para geração das ondas guiadas.

O teste realizado consiste na geração de ondas guiadas para inspeção do tubo. Neste teste um transdutor funciona como transmissor e o outro como receptor e o objetivo é detectar uma *interface* diferente fixa na parte interna do tubo. Para gerar as ondas guiadas deve-se selecionar a frequência adequada no equipamento de ultra-som para que o comprimento de onda do sinal gerado seja maior ou igual à espessura do tubo utilizado. Para determinar a frequência correta basta dividir a velocidade de propagação do som no material (4800 m/s para o ferro galvanizado) pela sua espessura. Com isso foi observado que com uma frequência de 1 MHz as ondas guiadas foram geradas, assim com frequências menores ou igual a 1 MHz as ondas guiadas podem ser geradas para o tubo utilizado. Os ângulos de incidência também têm influência na geração das ondas guiadas e com isso foram utilizados ângulos de 60° e 70°

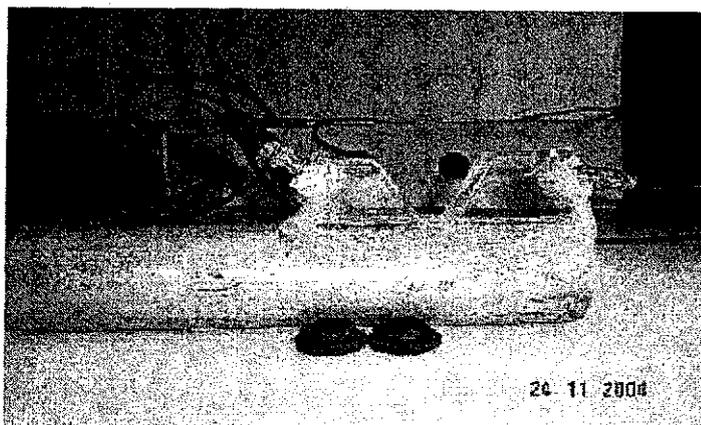


Figura 4.3: Fotografia do detalhe do acoplamento entre os transdutores e o tubo.

que favoreceram a geração deste tipo de onda. A escolha dos ângulos é feita de forma que haja conversão de modos [40], ou seja, interferência entre as ondas longitudinais e transversais. Se os ângulos são reduzidos, pode-se chegar ao primeiro ângulo crítico em que as ondas transversais se propagam apenas na superfície da parede do tubo, de forma a não existir conversão de modos e com isso não há a geração das ondas guiadas [41].

Com o equipamento ajustado para a frequência adequada e os ângulos de incidência corretos foi possível gerar as ondas guiadas. Assim um transdutor transmite o sinal de ultra-som que se propaga ao longo do tubo e é recebido pelo outro transdutor. Na tela do equipamento é mostrado o sinal transmitido e o sinal recebido. Para avaliar a presença de uma *interface* diferente no interior do tubo, observa-se uma redução na amplitude do sinal recebido, já que quando a onda guiada encontra uma *interface* diferente, parte do sinal é transmitida para esta *interface* de modo a reduzir a amplitude do sinal recebido. Como o equipamento de ultra-som possui uma saída de vídeo, é possível conectá-lo a um osciloscópio digital para visualizar os sinais transmitidos e recebidos. Na Figura 4.4 está ilustrada uma representação da tela do osciloscópio digital com os sinais monitorados. Observa-se que as amplitudes dos sinais são praticamente iguais devido à pequena distância entre os transdutores (menor atenuação) e aos ajustes de ganho do equipamento. Este teste foi realizado com o tubo em vazio, ou seja, sem nenhuma substância em seu interior.

Quando uma *interface* diferente foi fixada na parte interna do tubo, a amplitude do sinal recebido foi reduzida de acordo com a espessura da nova *interface*, desta forma pode-se utilizar essa configuração para a detecção da incrustação uma vez que este processo provoca o acúmulo de material na superfície interna das tubulações.

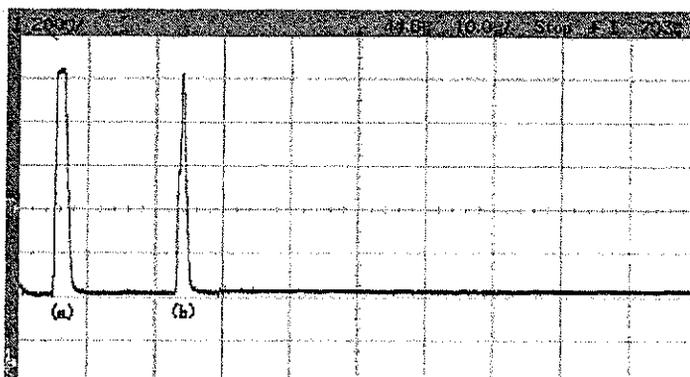


Figura 4.4: Representação da tela do osciloscópio com os sinais: transmitido (a) e recebido (b).

O sinal recebido foi observado com o ensaio realizado com o tubo limpo, ou seja, sem nenhuma substância em seu interior. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2. A cada intervalo de tempo de 30 minutos uma medição foi realizada para avaliar a amplitude dos sinais transmitido e recebido.

Tabela 4.1: Valores das amplitudes dos sinais monitorados durante os testes no primeiro dia (16/06/2004).

Horário (h)	Sinal transmitido (V)	Sinal recebido (V)
11:00	10	9,5
11:30	10	9,5
12:00	10	10
14:00	10	10
14:30	10	10
15:00	10	10
15:30	10	10
16:00	10	10
16:30	10	10
17:00	10	10

Houve uma redução na amplitude do sinal recebido mesmo sem nenhuma substância (*interface*) no interior do tubo, e isso foi devido ao acoplante utilizado que resseca com o tempo, impedindo que o sinal possa ser transmitido. Com o passar do tempo o acoplante utilizado resseca criando uma *interface* entre o guia de onda (cunha) e o tubo, reduzindo assim a amplitude do sinal recebido.

Foi observado também que com o ressecamento do acoplante há uma redução na sensibilidade de detecção de uma *interface* diferente no interior do tubo, pois o sinal do transdutor não

Tabela 4.2: Valores das amplitudes dos sinais monitorados durante os testes no segundo dia (17/06/2004).

Horário (h)	Sinal transmitido (V)	Sinal recebido (V)
11:00	10	6
11:30	10	6
12:00	10	6
14:00	10	5
14:30	10	5
15:00	10	5
15:30	10	5
16:00	10	5
16:30	10	5
17:00	10	5

é totalmente transmitido ao longo do tubo. Depois de dois dias houve uma redução de 50% na amplitude do sinal recebido devido ao ressecamento do acoplante, como está ilustrado na Figura 4.5.

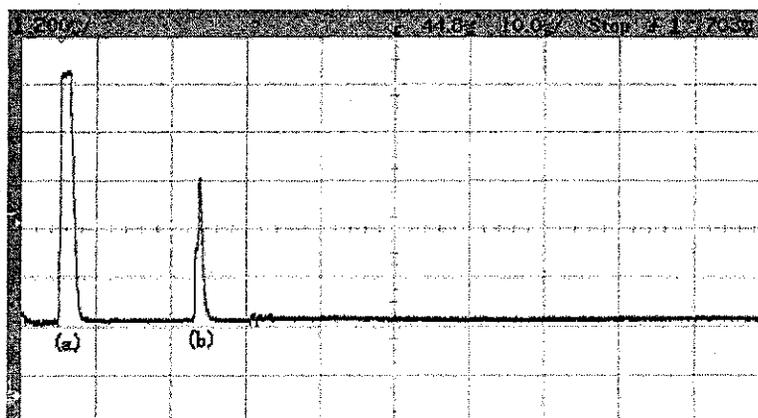


Figura 4.5: Representação da tela do osciloscópio ilustrando a redução na amplitude do sinal recebido após dois dias devido ao ressecamento do acoplante. (a) Sinal transmitido e (b) Sinal recebido.

Com isso o acoplante utilizado inicialmente (carbogel) foi trocado por outro acoplante. O novo acoplante escolhido foi a glicerina. A glicerina é freqüentemente utilizada pois adere mais efetivamente às superfícies do que a água ou óleo e também devido a sua impedância acústica ser melhor para os transdutores e objetos sob teste [39].

Novos testes foram realizados utilizando a glicerina como acoplante com o tubo em vazio,

sem nenhuma *interface* em seu interior, e foi observado que a glicerina não resseca de forma que este é o acoplante ideal para realização dos testes para detecção da incrustação, uma vez que não há redução do sinal recebido devido à influência do acoplante. Os dados obtidos utilizando a glicerina como acoplante com o tubo em vazio estão ilustrados nas Tabelas 4.3 e 4.4. Estes dados foram obtidos observando a tela do equipamento de ultra-som como ilustrado na Figura 4.6.

Tabela 4.3: Valores percentuais das amplitudes dos sinais monitorados utilizando glicerina como acoplante (08/07/04).

Horário (h)	Sinal transmitido (%)	Sinal recebido (%)
11:00	100	70
11:30	100	70
12:00	100	70
14:00	100	70
14:30	100	70
15:00	100	70
15:30	100	70
16:00	100	70
16:30	100	70
17:00	100	70

Tabela 4.4: Valores percentuais das amplitudes dos sinais monitorados utilizando glicerina como acoplante após alguns dias (20/07/04).

Horário (h)	Sinal transmitido (%)	Sinal recebido (%)
11:00	100	70
11:30	100	70
12:00	100	70
14:00	100	70
14:30	100	70
15:00	100	70
15:30	100	70
16:00	100	70
16:30	100	70
17:00	100	70

A amplitude do sinal recebido foi ajustada utilizando os controles de ganho do equipamento de forma que o sinal recebido é 70% do sinal transmitido quando não há nenhuma *interface* diferente no interior do tubo. Se alguma *interface* (substância) é colocada no interior do tubo há uma redução na amplitude do sinal de acordo com a espessura da nova *interface*.

Em seguida foram feitos novos testes para observar a redução do sinal recebido quando uma *interface* diferente é colocada no interior do tubo. Os dados obtidos estão ilustrados na Figura 4.6. Neste teste foi colocado, no interior do tubo, uma substância (goma de mascar) com uma espessura de aproximadamente 2 mm e observou-se uma redução na amplitude do sinal recebido de forma que há uma fuga do sinal transmitido na nova *interface*. Com isso pode-se determinar a presença de uma *interface* diferente no interior do tubo.

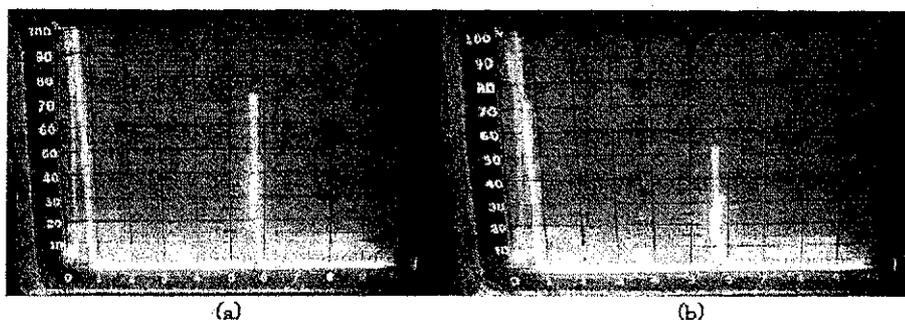


Figura 4.6: Fotografia da tela do equipamento de ultra-som ilustrando a redução na amplitude do sinal recebido com uma *interface* no interior do tubo. (a) Tubo limpo. (b) Tubo com uma *interface* em seu interior.

4.3 Conclusões

Foram realizados testes com um equipamento de ultra-som e o método de ondas guiadas longitudinais foi utilizado para detecção de *interfaces* diferentes no interior de um tubo. Os testes preliminares com o equipamento ajudaram a definir a viabilidade desta solução e a especificação da plataforma.

Capítulo 5

Plataforma para detecção da incrustação em dutos

5.1 Introdução

Uma plataforma para testes com líquidos foi projetada e montada para realização de ensaios para detecção da incrustação. Analisando os testes preliminares com aparelho de ultra-som e observando o seu funcionamento, os circuitos para os transmissores e receptores, que funcionam com os transdutores de ultra-som foram projetados, desenvolvidos e testados.

5.2 Projeto da plataforma para realização dos ensaios

A plataforma é composta por um reservatório (onde as substâncias para os ensaios são colocadas), por tubulações de ferro galvanizado com partes removíveis (onde os transdutores são fixados), por válvulas para controle do fluxo, por uma bomba centrífuga a motor e por um módulo para controlar a temperatura. Dentro do reservatório existe uma malha de refrigeração que é controlada pelo módulo, de forma que a temperatura do reservatório pode ser reduzida até aproximadamente $2^{\circ}C$. No reservatório encontra-se um sensor de temperatura (LM35) [35] para monitoramento da temperatura das substâncias sob ensaio. Para aumentar a temperatura da plataforma, existem duas resistências de aquecimento de $600\ W$ cada, que também são controladas pelo módulo controlador. Neste módulo é possível ajustar a temperatura do sistema de $2^{\circ}C$ até aproximadamente $60^{\circ}C$. Com a redução da temperatura é possível acelerar o processo de incrustação nas tubulações [36], por isso é utilizada uma malha de refrigeração

dentro do reservatório. O uso das resistências de aquecimento é para aumentar a temperatura com o objetivo de reduzir a incrustação nas tubulações [36]. Com isso pode-se acompanhar o aumento ou redução da incrustação nas tubulações utilizando o sistema proposto.

Na Figura 5.1 está ilustrado um diagrama da plataforma com as suas partes componentes. Nesta figura são apresentados os detalhes da plataforma projetada.

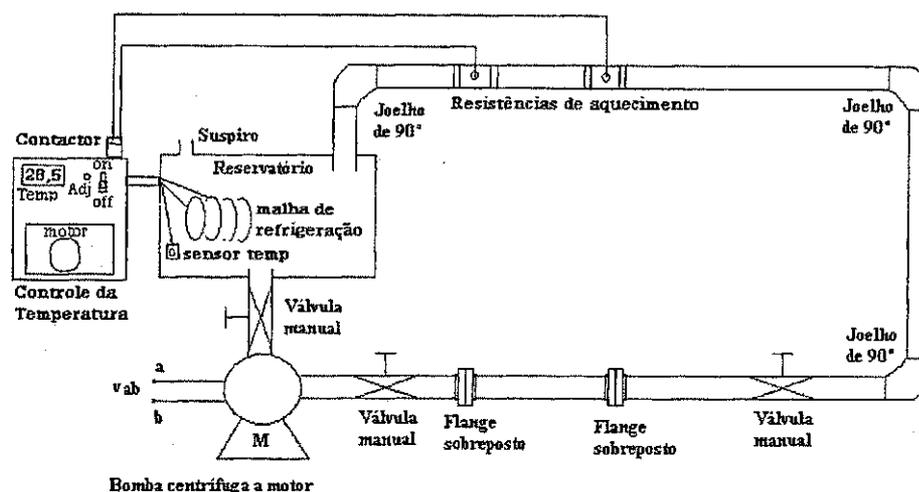


Figura 5.1: Diagrama da plataforma desenvolvida para realização dos testes.

As tubulações da plataforma montada juntamente com as resistências de aquecimento estão ilustradas na Figura 5.2. As resistências de aquecimento são utilizadas para aumentar a temperatura do sistema para que o processo de incrustação possa ser analisado sob diferentes condições.

O reservatório, onde as substâncias para os ensaios são colocadas, o módulo de controle da temperatura, a bomba centrífuga e as válvulas manuais utilizadas na plataforma estão ilustradas na Figura 5.3.

Na Figura 5.4 está ilustrado com mais detalhe a malha de refrigeração que está localizada dentro do reservatório. Esta malha é utilizada para reduzir a temperatura das substâncias sob testes e é controlada pelo módulo controlador.

Com a plataforma montada, os ensaios para medição e avaliação do processo de incrustação podem ser realizados com diferentes condições de temperatura, de modo que tal processo possa ser observado quando começa a aparecer nas tubulações da plataforma. Com a plataforma desenvolvida, líquidos podem ser colocados no reservatório para observar sua influência no processo de incrustação em tubulações.

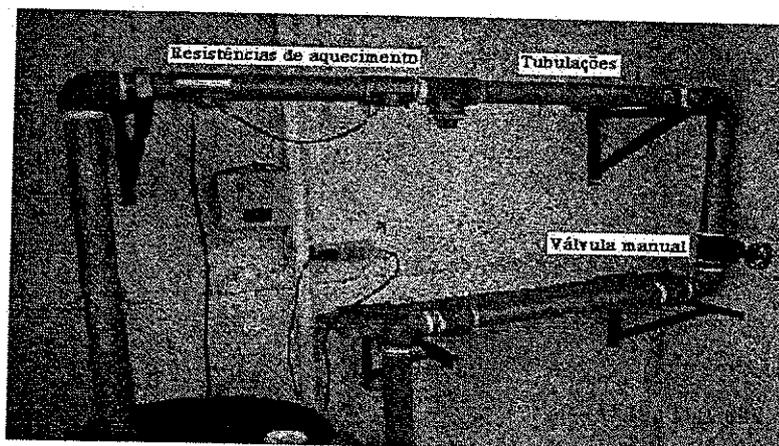


Figura 5.2: Fotografia das tubulações da plataforma desenvolvida para realização dos testes com as resistências de aquecimento e válvula manual.

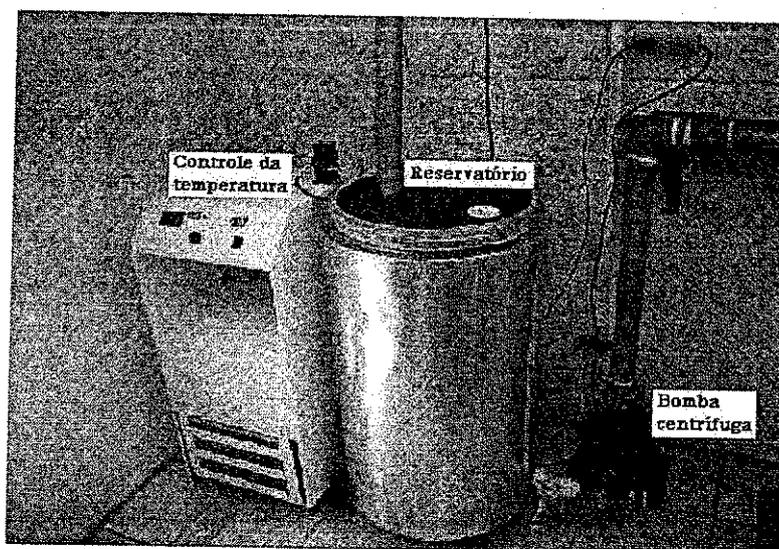


Figura 5.3: Fotografia do reservatório, módulo de controle e bomba centrífuga utilizada na plataforma.



Figura 5.4: Fotografia da malha de refrigeração.

Para acelerar o processo de incrustação nas tubulações sob testes, as substâncias abaixo são utilizadas. As quantidades especificadas são para um reservatório com 100 litros de solução. Com isso foi colocado no reservatório 100 litros de água destilada junto com os compostos citados abaixo. Para aumentar a incrustação basta aumentar as quantidades das substâncias [37].

- 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 características das substâncias são do efluente (água de produção) da unidade de tratamento e bombeamento da PETROBRÁS localizada em Guamaré-RN [37], com o intuito de que os testes realizados se aproximem o máximo das condições reais do processo de incrustação que ocorre em tubulações.

5.3 Desenvolvimento dos circuitos do pulsador e receptor ultra-sônico

Observando as características dos ensaios ultra-sônicos e suas vantagens como grande poder de penetração, alta sensibilidade, grande precisão, não prejudicial ao operador, além de ser uma técnica não intrusiva, iniciou-se o desenvolvimento dos circuitos de excitação e recepção para os transdutores ultra-sônicos.

Tipicamente os transdutores de ultra-som são excitados com pulsos de tensão unipolares e de curta duração para gerar as ondas ultra-sônicas [42].

As formas de onda mais freqüentemente utilizadas para excitar os transdutores são: spike e trem de pulsos.

Desde de que a pressão acústica na frente da face do transdutor é diretamente proporcional à derivada da tensão aplicada em relação ao tempo, dV/dt , é importante minimizar o tempo de subida do pulso aplicado para aumentar a pressão acústica [42].

O uso de trem de pulsos aumenta a capacidade para controlar os parâmetros dos testes com transdutores ultra-sônicos (largura dos pulsos, amplitude, freqüência) e por isso são mais utilizados.

Os transdutores ultra-sônicos são tipicamente excitados com pulsos de amplitude de 100 V à 1000 V. O sinal recebido pode variar de microvolts a alguns volts. O sinal recebido pode também exibir características muito diferentes dos pulsos usados para excitar os transmissores [42].

A recepção dos sinais de ultra-som possui alguns estágios básicos: após a recepção pelo transdutor, os sinais são sucessivamente filtrados e pré-amplificados e em seguida são novamente amplificados e filtrados para que possam ser analisados [42].

5.3.1 Desenvolvimento do pulsador

De acordo com as características analisadas anteriormente e observando circuitos que utilizam MOSFETs para chaveamento dos pulsos de excitação de transdutores ultra-sônicos [43-45], optou-se por projetar um pulsador com pulsos de curta duração (aproximadamente 0,5 μs) e amplitude de 200 V com freqüência de 500 kHz, uma vez que para o tubo utilizado

freqüências menores ou igual a 1 MHz podem ser utilizadas para gerar as ondas guiadas. Na Figura 5.5 está ilustrado um 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 freqüência desejada para excitar o transdutor ultra-sônico. Também é utilizado um acionador de corrente para fornecer a corrente requerida pela chave analógica.

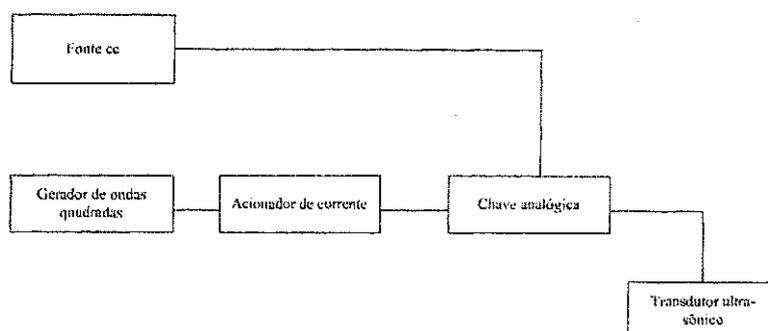


Figura 5.5: Diagrama de blocos do circuito pulsador.

Um diagrama esquemático do circuito projetado para o pulsador está ilustrado na Figura 5.6. 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.

O circuito projetado foi simulado utilizando o software Orcad-Pspice e os resultados estão ilustrados na Figura 5.7. Nesta figura podem-se observar os pulsos de alta amplitude e curta duração, utilizados para excitar os transdutores de ultra-som. A forma dos pulsos observada nesta figura possui algumas distorções devidas às características dos componentes utilizados na simulação, como o tempo de subida dos transistores.

Em seguida foram realizados testes práticos com o circuito do pulsador sem conectá-lo ao transdutor de ultra-som e os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 5.8. Nesta figura está ilustrada a representação da tela do osciloscópio onde os pulsos gerados podem ser observados. Estes pulsos possuem amplitude de 200 V e uma freqüência de 500 kHz e são utilizados para excitar os transdutores de ultra-som.

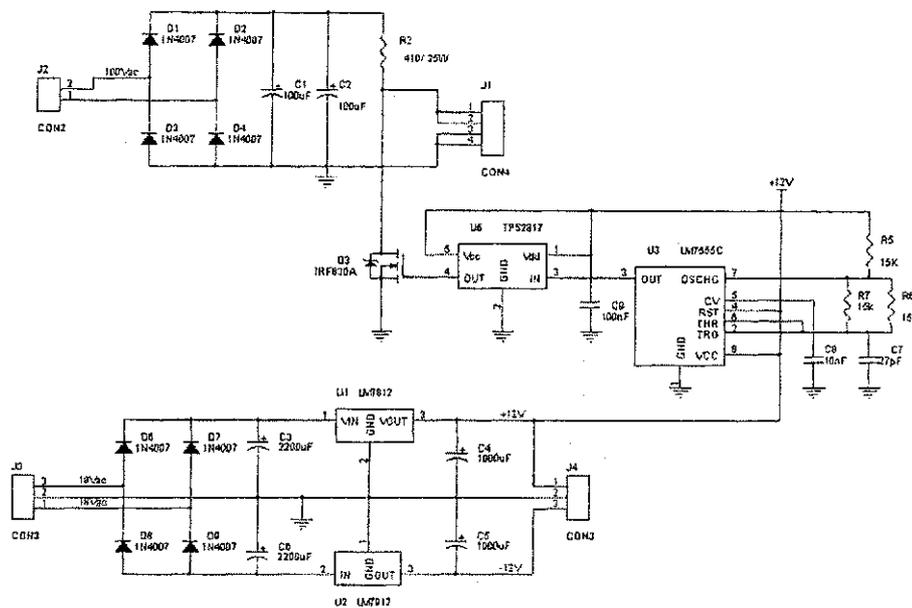


Figura 5.6: Diagrama esquemático do circuito para o pulsador ultra-sônico.

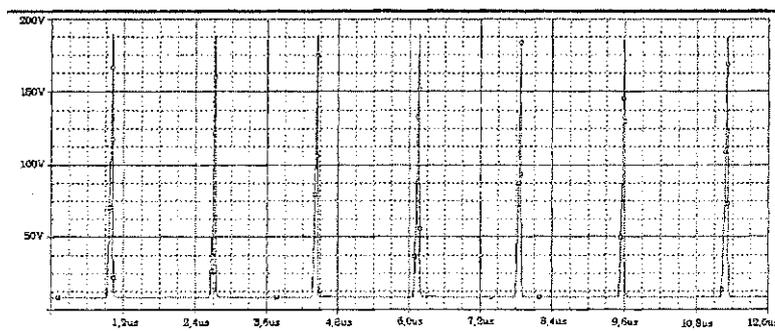


Figura 5.7: Gráfico da forma de onda na saída do circuito pulsador.

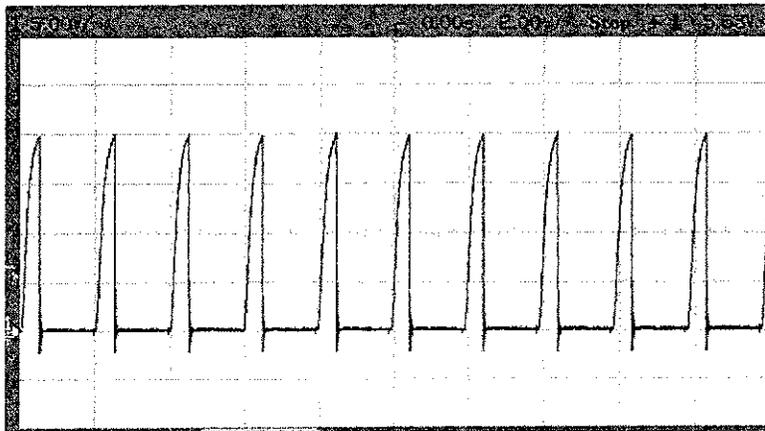


Figura 5.8: Representação da tela do osciloscópio mostrando a saída do pulsador.

5.3.2 Desenvolvimento do receptor

O receptor foi projetado utilizando estágios de amplificação e filtragem para detectar os sinais recebidos pelo transdutor receptor. Na figura 5.9 está ilustrado 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.

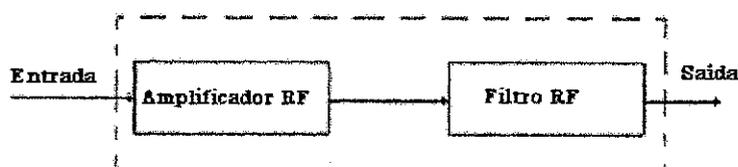


Figura 5.9: Diagrama de blocos simplificado do receptor.

Um diagrama esquemático do circuito projetado para o receptor está ilustrado na Figura 5.10. Nesta figura estão apresentados os componentes utilizados na montagem do receptor ultra-sônico.

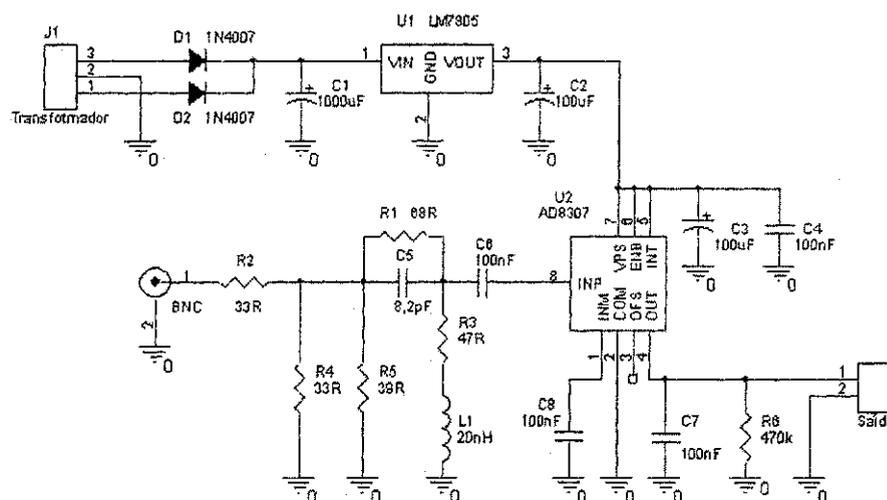


Figura 5.10: Diagrama esquemático do circuito receptor.

O circuito do receptor foi projetado baseado no circuito integrado AD8307 [46]. Na saída

do circuito tem-se um valor de tensão que é o equivalente logarítmico da amplitude do sinal de entrada. A impedância de entrada do circuito está dimensionada para 50Ω . A rede C5-R3-L1 serve para compensar as indutâncias e capacitâncias parasitas.

Depois de montado foram realizados testes com o circuito do receptor. Para realização destes testes foi utilizado o circuito do pulsador para excitar o transdutor (transmissor) e o receptor foi conectado ao segundo transdutor (receptor), utilizando a configuração da Figura 4.3 com o objetivo de gerar ondas guiadas ao longo do tubo. O sinal obtido pelo receptor foi monitorado utilizando um osciloscópio digital.

Os resultados obtidos com este ensaio estão ilustrados na Figura 5.11. Nesta figura o sinal recebido e visualizado pelo osciloscópio possui uma amplitude de pico-pico de 200 mV e uma frequência de 500 kHz visualizados no modo RF. Sinais recebidos com a mesma forma de onda são apresentados em [47] e [48] em ensaios ultra-sônicos.

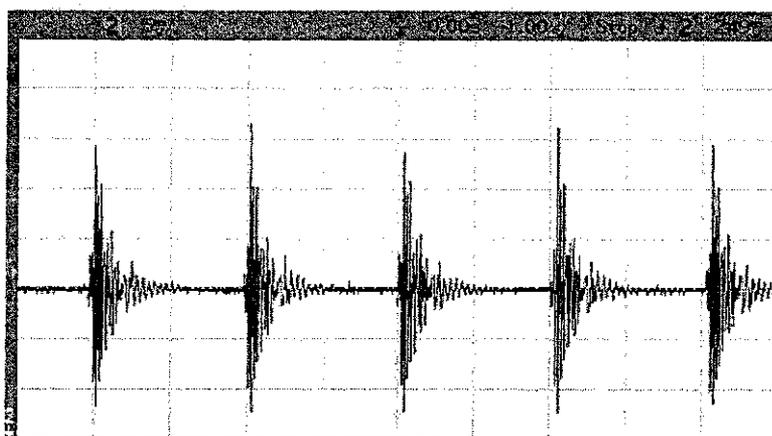


Figura 5.11: Representação da tela do osciloscópio mostrando a saída do receptor no modo RF.

Da mesma forma do ensaio utilizando o equipamento de ultra-som, foi colocada uma *interface* diferente no interior do tubo e novamente houve uma redução na amplitude do sinal recebido devido às perdas na nova *interface* [49]. Estes resultados podem ser observados nas Figuras 5.12 e 5.13.

Utilizando o osciloscópio digital também foi observado o sinal de excitação na entrada do transmissor e este sinal está ilustrado na Figura 5.14. Analisando estes resultados foi observada uma redução na amplitude do sinal de excitação, além de uma distorção na forma deste sinal. A amplitude dos pulsos foi reduzida para 70 V , mas a frequência não foi alterada. Isto ocorreu devido à influência da impedância de entrada do transdutor no circuito de excitação. Mas mesmo com a redução na amplitude dos pulsos o circuito projetado para o pulsador conseguiu

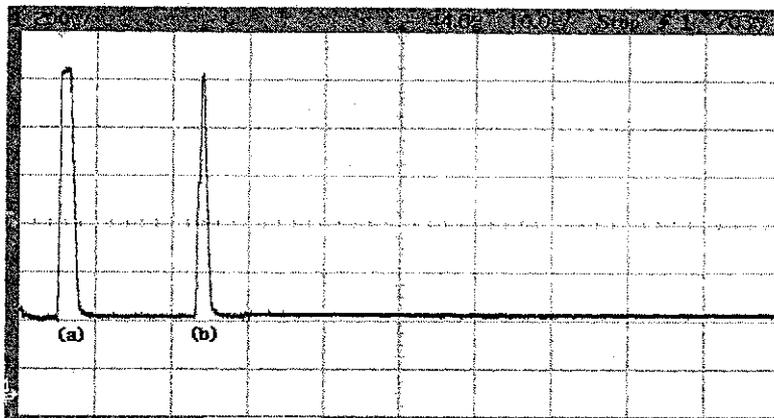


Figura 5.12: Representação da tela do osciloscópio com os sinais transmitido (a) e recebido (b) sem *interface* no interior do tubo.

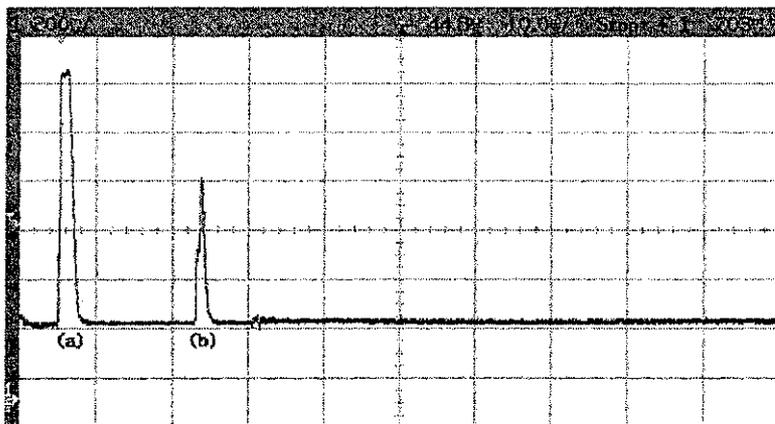


Figura 5.13: Representação da tela do osciloscópio com o sinal transmitido (a) e recebido (b) com *interface* no interior do tubo.

excitar o transdutor ultra-sônico fazendo com que as ondas guiadas se propagassem ao longo do tubo e pudessem ser detectadas pelo receptor.

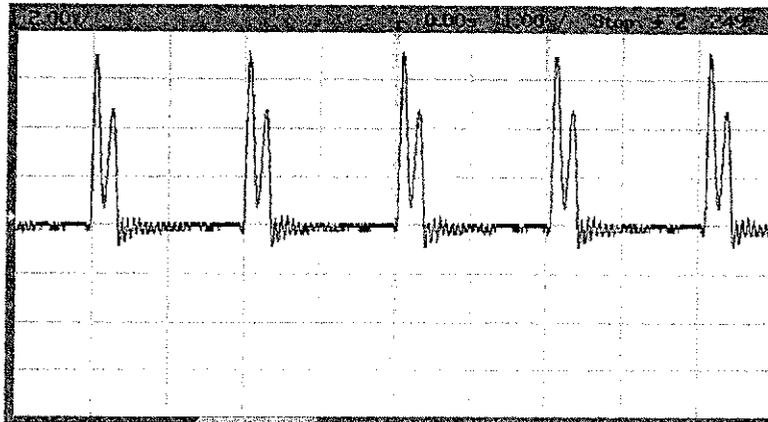


Figura 5.14: Representação da tela do osciloscópio mostrando a saída do pulsador conectado ao transdutor (transmissor).

Para resolver o problema da redução na amplitude do sinal de saída do circuito pulsador quando este é conectado ao transdutor, foi feita uma pequena modificação na saída deste circuito adicionando um capacitor (C10) e um resistor (R1), de forma que o capacitor quando se carrega transfere a tensão para o transdutor que descarrega pelo resistor de saída. O circuito projetado com estas modificações está ilustrado na Figura 5.15.

Novos testes foram realizados com o circuito do pulsador modificado e os resultados estão ilustrados na Figura 5.16. A amplitude do sinal de excitação aumentou para aproximadamente 100 V com uma frequência de 500 kHz, mostrando que houve uma melhora considerável em relação ao circuito projetado anteriormente. E com isso foi possível excitar o transdutor com um sinal de maior amplitude, fazendo com que uma maior potência acústica possa ser transmitida.

5.4 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado o projeto da plataforma para monitoramento do processo de incrustação, que foi montada, para possibilitar a análise deste processo sob diferentes condições de temperatura, uma vez que na plataforma existe um módulo para controlar esta grandeza. Foram desenvolvidos circuitos para excitar os transdutores de ultra-som e para receber os sinais produzidos por estes transdutores. Os circuitos foram testados e os resultados foram comparados com aqueles obtidos com o aparelho de ultra-som para validar os testes.

Capítulo 6

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

6.1 Conclusões

Nesta dissertação uma plataforma para detecção e monitoramento do processo de incrustação foi desenvolvida. A plataforma é formada basicamente por um reservatório, por tubulações e por um módulo de controle de temperatura. Nas tubulações encontram-se acoplados os transdutores de ultra-som que são utilizados juntamente com os circuitos de excitação e recepção para o monitoramento da incrustação.

A grande vantagem do uso de técnicas com ultra-som é a sua característica não intrusiva que permite a inspeção das tubulações sem a necessidade de parar o processo de transporte do fluido. Por isso optou-se pela utilização desta técnica na plataforma desenvolvida.

Os circuitos projetados, para excitação e recepção dos sinais de ultra-som, foram testados e os resultados obtidos foram comparados com os testes realizados com o aparelho de ultra-som para validação dos resultados e confirmação do método de ondas guiadas longitudinais para monitoramento da incrustação.

Um problema encontrado durante os testes foi a escolha do acoplante ideal para realização dos ensaios, uma vez que a escolha do acoplante influencia diretamente nos resultados das medições.

Com a utilização da plataforma para detecção da incrustação, pretende-se diminuir os custos com manutenção e agilizar os processos de monitoramento em sistemas com tubulações.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para continuação deste trabalho, sugere-se:

- Uso de outras técnicas que utilizam ultra-som, como a técnica de onda guiada circunferencial.
- Melhoramentos nos circuitos de excitação e recepção para aumentar a precisão na detecção do processo de incrustação.
- Utilização da plataforma para determinação de forma quantitativa da incrustação.
- Instalação de sensores de pressão e vazão na plataforma, para monitorar estas grandezas.
- Uso de um conjunto de transdutores ultra-sônicos para determinação da incrustação através de imagens.

Referências Bibliográficas

- [1] 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.
- [2] G. A. Mansoori. *Physicochemical Basis of Arterial Blockage/Fouling Prediction and Prevention*. University of Illinois at Chicago, USA. September, 2001.
- [3] 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.
- [4] G. A. Mansoori. *Modeling of Asphaltene and other Heavy Organics Depositions*. Journal of Petroleum Science e Engineering, 1997, vol. 17, pp. 101-121. Elsevier Science.
- [5] 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 Ciencia e Tecnologia, 2002.
- [6] 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.
- [7] D. Vasquez and G. A. Mansoori. *Analysis of Heavy Organic Deposits*. University of Illinois at Chicago, USA, 2000.
- [8] L. Zewen and G. Ansong. *Asphaltenes in Oil Reservoir Recovery*. Chinese Science Bulletin. Vol. 45, No. 8. April, 2000.
- [9] C. B. Panchal. *Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchange Equipment*. Begell House, New York, 1997.

-
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Seção Especial Petróleo e Gás, Monitoramento 24 h-Química Aplicada. *Cupom de Perda de Massa e Sensor de Resistividade Elétrica*. Revista Ciência Hoje, vol. 31, pp. 80-81, Edição: Roberto Barros e Carvalho, Setembro, 2002.
- [13] Corrvie International, LLC. *The Benefits and Limitations of Corrosion Coupons*. Technical information on coupon testing. www.CorrView.com. Novembro, 2003.
- [14] Metal Samples. *Corrosion Coupons*. Corrosion Monitoring Systems. Technical information. www.metalsamples.com. Novembro, 2003.
- [15] A. S. Krisher. *Technical Information Regarding Coupon Testing*. ASK Associates, St. Louis, Missouri. Novembro, 2003.
- [16] Metal Samples. *Electrical Resistance Probes*. Corrosion Monitoring Systems. www.probes.corrosionmonitoring.htm. Dezembro, 2003.
- [17] Metal Samples. *Electrical Resistance Monitoring*. Corrosion Monitoring Systems. www.corrosionmonitoring.probes.htm. Dezembro, 2003.
- [18] Corrosion Monitoring, Corrosion Probes. *Electrical Resistance*. <http://www.harris-scientific.com>. Dezembro, 2003.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] T. R. Hay and J. L. Rose. *Fouling Detection in the Food Industry Using Ultrasonic Guided Waves*. Food control. Elsevier Science, September 2002.

- [33] 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.
- [34] J. L. Santin. *Ultra-som: Técnica e Aplicação*. Qualitymark Ed. Rio de Janeiro, 1996.
- [35] National Semiconductor. *Precision Centigrade Temperature Sensors-LM35*. USA. 1999.
- [36] W. A. Bueno, F. A. Leone, L. Degreve, J. F. C. Boodts. *Química Geral (Fatores que Afetam a Solubilidade das Substâncias)*. São Paulo, McGraw-Hill, 1978.
- [37] I. M. N. Brasileiro. *Tecnologia Eletroquímica Aplicada na Degradação de Poluentes da Indústria de Petróleo*. Tese de Doutorado. UFCG. 2005.
- [38] Sonic Instruments Incorporated. *Operation and Service Manual-Model FTS MARK I*. Trenton, N.J. USA. 1980.
- [39] F. Chang, G. Andrew. *Coupling media for Tests-Ultrasonic Pulse Echo Contact Techniques*. Nondestructive Testing Handbook. 2 ed. Ultrasonic Testing. Vol. 7. USA. 1991.
- [40] H. Wustemberg, A. Erhand. *Approximative Modeling for Practical Application at Ultrasonic Inspections*. Application Workshop in May 97. NDTnet. Vol.2. May 1997.
- [41] E. Henneke, D. Chimenti, E. Papadakis. *Fundamental Principles of Ultrasonic Wave Propagation*. Nondestructive Testing Handbook. 2 ed. Ultrasonic Testing. Vol. 7. USA. 1991.
- [42] C. M. Fortunko. *Generation and reception of ultrasonic signal-Ultrasonic Testing Equipment*. Nondestructive Testing Handbook. 2 ed. Ultrasonic Testing. Vol. 7. USA. 1991.
- [43] Y. Mizutani, T. Suzuki, H. Ikeda, H. Yoshida. *Power maximizing of ultrasonic transducer driven by MOS-FET inverter operating at 1MHz*. Proceedings of the IEEE IECON. Vol.2. Aug. 1996. 22nd International conference on industrial electronics control and instrumentation.
- [44] J. P. Sferruzza, A. Birer, Y. Theillere, D. Cathignol. *Generation of high power unipolar pulse with a piezocomposite transducer*. IEEE Symposium. 1996. pp. 1125-1128.
- [45] J. L. San Eneterio, A. Ramos, P. T. Sanz, A. Ruiz, A. Azbaid. *Modeling NDT piezoelectric ultrasonic transmitters*. Ultrasonics. Elsevier. 2004. pp. 277-281.
- [46] Analog Devices. *Low Cost DC-500MHz, 92dB Logarithmic Amplifier-AD8307*. Norwood, M.A, USA. 1999.

-
- [47] A. M. Sabatini. *A digital-signal-processing technique for ultrasonic signal modeling and classification*. IEEE transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.50. No.1, February 2001.
- [48] J. Salazar, A. Turó, J. A. Chavez, J. A. Ortega, M. J. Garcia. *High-power high resolution pulser for Air-coupled ultrasonic NDE applications*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.52. No.6, December 2003.
- [49] 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.