



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

ALGORITMOS DE DETECÇÃO EM SINAIS DE ULTRASSOM PARA MEDIÇÕES DE ESPESSURAS EM ALVOS METÁLICOS

Bruno Furtado Montes Oliveira

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Eletrônica e de Computação da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: João Alfredo Pinto Magalhães,
D.Sc.

Orientador: Flávio Luis de Mello, D.Sc.

ALGORITMOS DE DETECÇÃO EM SINAIS DE ULTRASSOM PARA MEDIÇÕES DE ESPESSURAS EM ALVOS METÁLICOS

Bruno Furtado Montes Oliveira

Autor:

Bruno Furtado Montes Oliveira

Orientador:

João Alfredo Pinto de Magalhães, D.Sc.

Orientador:

Flávio Luis de Mello, D.Sc.

Examinador:

Carlos Fernando Teodósio Soares, D.Sc.

Examinador:

Heraldo Luís Silveira de Almeida, D.Sc.

DEL

Agosto de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica – Departamento de Eletrônica e de Computação

Centro de Tecnologia, bloco H, sala H-217, Cidade Universitária

Rio de Janeiro – RJ CEP 21949-900

Este exemplar é de propriedade da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

DEDICATÓRIA

Por toda minha vida até o momento em que escrevi esta dedicatória, o caminho que trilhei foi composto por gente que amo, que amei e que gostaria que estivesse aqui por mais tempo para que eu ainda as pudesse amar. Quando digo caminho, não imagino uma linha reta, simples e monótona, e sim um caminho torto, com loops, inclinações impossíveis, não-linear e variante no tempo. E, junto delas e do meu amor por elas, que fiz as escolhas que me levaram até este exato momento em que as escrevo.

A todas elas, eu dedico este meu trabalho. Sem nenhuma exceção.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao CPTI, à Minds at Work e PETROBRAS por tornarem este projeto e estudos possíveis.

Agradeço também a todas as pessoas do meu círculo de trabalho, que me ajudaram com suporte, dúvidas e apoio: João Magalhães, José Felipe Lima, Cláudio Camerini, Miguel Freitas, Alan Kubrusly, Davi Vianna, Bruno Salles, Flávio Cavalcante, Rafael, Raphael, Rodrigo, Carlos, Jorge e a Marcelo Roberto Jiménez.

Não posso também deixar de agradecer a todos os meus amigos e colegas pelos incentivos e puxões de orelha, que foram indispensáveis para mim, em bons e tristes momentos da minha vida.

Aos meus familiares, meu muito obrigado, por todo carinho e amor investidos em mim para que eu tenha chegado até aqui.

RESUMO

Empresas que trabalham com estruturas compostas por materiais metálicos possuem a necessidade de avaliação das próprias durante sua construção e após, durante a realização de manutenções, a fim de manter um nível de operação e qualidade adequados. É o caso, por exemplo, de empresas de transporte de fluidos (tais como álcoois e combustíveis fósseis, por exemplo óleos e gases), que se utilizam de redes de dutos de transmissão que podem possuir percursos com dezenas de quilômetros de extensão. A manutenção da sua rede constitui um processo de custo e risco elevados, que envolvem questões ambientais. Diferentes soluções foram pesquisadas para minimizar o custo de implementação, agilizar o processo de inspeção estrutural e reduzir o seu tempo total, uma vez que a interrupção da produção de uma determinada linha da rede normalmente é necessária. Transdutores de ultrassom são excelentes ferramentas para detecção de falhas estruturais ao longo de chapas e dutos, como corrosões, problemas de solda, derivações etc., uma vez que possuem a capacidade de avaliação de superfícies interna e externa do alvo. Com os dados obtidos, uma análise é feita com diferentes algoritmos para traduzir dados de ultrassom em informações visuais, para, então, o usuário julgar com confiança do que se trata a informação (defeito) a ele apresentada. Com diferentes resultados em cima de um mesmo conjunto de dados, uma análise comparativa permite ao analista diminuir a ocorrência de erros de interpretação no processo final e geração de relatórios técnicos.

Palavras-chave: Ultrassom, AScan, inspeção, dutos, PIG, engenharia, detecção, falha estrutural, software, ensaios não-destrutivos

ABSTRACT

Companies that work with metallic structures may need to evaluate them during its construction process and later, during the realization of maintenance, in order to keep a proper level of operation and quality control. That is the case of companies which work with fluid transportation (such as oil and gases), that might have transmission pipelines with dozen of kilometers in extension. Its maintenance process may become costly and risky, among other reasons, because of environmental issues. Different solutions have been studied to minimize the implementation cost, to speed up the inspection process and to reduce the overall inspection time, since interrupting the production of a given line of the network is usually required. Ultrasound transducers are excellent tools for detecting structural failures on plates and pipelines, such as corrosions, soldering problems, derivations etc., since they have the capacity to “observe” it from the inside out. The obtained data provides resources for analysis which can be done with different algorithms that translate ultrasound data into visual information, helping analysts to judge such events with increased relevance. With different results obtained from the same dataset, a comparative analysis allows the analyst to reduce the occurrence of misinterpretations on the generation of technical reports.

Keywords: Ultrasound, AScan, inspection, pipeline, PIG, engineering, detection, structural failure, software, non-destructive evaluation

SIGLAS

A/D - Analógico/Digital (conversor)

AScan - *Amplitude Scan* (varredura de amplitude)

BScan - *Brightness Scan* (varredura de brilho)

CNC - *Computer(ized) Numerical Control* (Controle numérico computadorizado)

CPTI – Centro de Pesquisa em Tecnologia de Inspeção

CPU - *Central Processing Unit* (Unidade Central de Processamento)

CRL – *Crown-Rump Length* (Longitude céfalo-caudal)

DEL – Departamento de Eletrônica e de Computação

PIG – *Pipeline Inspection Gadget* (Dispositivo de Inspeção de Dutos)

NRMSD - *Normalized Root Mean Squared Deviation* (Raiz do Desvio Quadrático Médio Normalizado)

SE - *Sender-Empfanger* (Emissor-Receptor, em alemão)

SI - Sistema Internacional de Unidades

SNR - *Signal/Noise Ratio* (Relação Sinal/Ruído)

Sumário

1	Introdução	1
	1.1 - Tema	1
	1.2 - Delimitação	1
	1.3 - Justificativa	1
	1.4 - Objetivos	2
	1.5 - Metodologia	3
	1.6 - Descrição	4
2	Fundamentação Teórica	5
	2.1 – Introdução	5
	2.1.1 – Ultrassom	5
	2.1.2 – Transdutor	7
	2.2 – AScan	10
3	Algoritmos de Detecção de Ecos em AScan	12
	3.1 - Introdução	12
	3.2 - Problemas na detecção	13
	3.3 - Análise a olho Nu e cálculo direto	15
	3.4 – Detecção por limiar Estático	18
	3.5 – Detecção por Pico Absoluto	19

3.6 – Detecção por Flancos	20
4 Testes	21
4.1 - Introdução	21
4.2 – Montagem para inspeção de objetos no aquário CNC.	21
4.3 - Alvo de 15 mm	22
4.4 – Chapa CPTI	26
4.5 – Rotor com furos não-passantes.	31
4.6 – Corrida real.	33
5 Considerações Finais	37
5.1 – Conclusão	37
5.2 – Trabalhos Futuros	37
Bibliografia	39
A Algoritmo de Limiar estático	56
B Algoritmo de Picos Absolutos	58
C Algoritmo de Limiar Dinâmico	59

Lista de Figuras

2.1 – Imagem de ultrassom de um feto em 12 semanas de gestação	6
2.2 - Scanner de Ultrassom do CPTI em parceria com a Pipeway [9]	7
2.3 - Princípio da piezoresistividade em um cristal	8
2.4 - Transdutores de imersão de 5MHz e de 15MHz	9
2.5 - Módulo com sensores de um PIG Ultrassom	10
2.6 - AScan de uma chapa metálica utilizando um transdutor de imersão de 5MHz	11
3.1 - Acoplamento perpendicular para transdutores de imersão e contato, respectivamente	13
3.2 - Exemplo de AScan com repetições de ecos de coluna d'água e de metal	16
3.3 - Informações calculadas para o AScan da figura 4.2	17
3.4 - Parâmetros utilizados na detecção de ecos	18
3.5 - Limiar estático com limiares superdimensionados	19
3.6 - Detecção de ecos em ciclos errados	19
3.7 – Detecção de Ecos com algoritmo de Flancos	20
4.1 – Aquário CNC	22
4.2 - Alvo de 15 mm	23
4.3 – Chapas e cortes para o Alvo de 15mm	25
4.4 - Sobreposição da repetição do eco de coluna d'água com ecos de metal	26

4.5 – Estrutura de seções da chapa CPTI	26
4.6 - Chapa CPTI	28
4.7 - Chapas de espessura e coluna d'água da chapa CPTI.	26
4.8 - Cortes lateral e longitudinal da chapa CPTI.	30
4.9 - Rotor.	32
4.10 - Vista das chapas de espessura e coluna d'água e do corte longitudinal para o Rotor.	33
4.11 - Comparação de chapas do ensaio em duto com PIG	35
4.12 - Cortes longitudinais para corrida com PIG em dutos de testes	35

Lista de Tabelas

3.1 – Velocidade do som em diferentes materiais.	16
4.1 – Limites para ensaio com alvo de 15 mm	24
4.2 - Resultados para o Alvo de 15mm	24
4.3 - Espessuras de cada seção da chapa CPTI.	27
4.4 - Limites de algoritmos para a chapa CPTI.	28
4.5 - Resultados da chapa CPTI	29
4.6 - Medidas calculadas para a chapa CPTI.	30
4.7 - Resultados para o Rotor.	32
4.8 - Limites de algoritmos para duto real	34
4.9 - Resultados para dutos reais	34

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Tema

O tema deste trabalho é o emprego de técnicas na interpretação de sinais elétricos provenientes de transdutores de ultrassom para detectar ecos e realizar medidas entre interfaces água/metal, com o intuito de estimar espessuras em alvos metálicos a fim de descobrir indicações de problemas estruturais.

1.2 - Delimitação

As técnicas demonstradas são desenvolvidas para utilização em diferentes sistemas de ultrassom, ainda que o escopo deste trabalho esteja delimitado à detecção de espessura de chapas metálicas dispostas em diferentes formatos e estruturas (tais como chapas curvas - dutos - e planas, como em cascos de navio).

Os algoritmos também podem ser utilizados em outras áreas, por exemplo no imageamento de assoalhos marinhos, na geofísica e na formação de diferentes tipos de imagens do corpo em exames não invasivos para a Medicina.

1.3 – Justificativa

O mercado de petróleo e gás possui uma grande demanda de inspeção de suas estruturas metálicas. Por exemplo, empresas de extração de combustíveis fósseis e de transporte de fluídos precisam garantir a integridade de suas redes de dutos de produção e transmissão. Operadores de plataformas de extração precisam garantir a integridade de seus tanques de armazenamento. Operadores de navios de transporte (petroleiros) precisam garantir a integridade de seus navios. Estes são apenas alguns exemplos que requerem inspeção em intervalos regulares para certificação de que operam dentro de padrões de segurança adequados, evitando acidentes e problemas ambientais.

Operações de inspeção tipicamente possuem custo elevado, e podem envolver indisponibilidade temporária do elemento inspecionado. Isto leva à necessidade de uso ferramentas eficientes, que minimizem os tempos de parada envolvidos, e que possuam resultados completos e confiáveis.

Uma das ferramentas utilizadas na inspeção de dutos é um instrumento de corpo cilíndrico chamado PIG (*Pipeline Inspection Gadget*). Um PIG [7] é projetado para percorrer o interior de um duto, com o objetivo de limpá-lo (*PIG de limpeza*) e inspecioná-lo (*PIG de inspeção*)[8].

Para este trabalho, foram realizados ensaios com transdutores de ultrassom sobre chapas e em dutos metálicos, este último com o auxílio de PIGs.

Existem casos onde o sinal colhido nos transdutores é muito ruidoso. Isto torna bem mais difícil o trabalho de interpretação por parte do analista, o que acarreta a necessidade de ferramental que o auxilie no cálculo de espessuras e distâncias.

Diferentes técnicas foram desenvolvidas para processar tais sinais, de maneira a reduzir ao máximo a falha na detecção dos sensores.

1.4 – Objetivos

Os sinais capturados nos sensores de ultrassom trazem consigo diferentes características referentes à situação que registram. Cada tipo de evento encontrado (como corrosões, mossas, faixas de solda e ovalizações da seção) possui uma assinatura de sinal muito bem definida.

Uma inspeção pode conter quilômetros de linha inspecionada, e o PIG pode conter centenas de transdutores organizados de maneira a recobrir a seção completa do duto com redundância de dados, havendo, portanto, a necessidade de poder computacional para o processamento de dados em grande quantidade.

O objetivo deste trabalho é propor formas eficientes para a conversão destes dados brutos de sensores de ultrassom em uma forma de visualização geral da inspeção, em um painel único com informações mais palpáveis.

Ao final, pretende-se qualificar cada uma das técnicas a serem apresentadas, de acordo com visibilidade de eventos e facilidade de reconhecimento do próprio.

As etapas para realização dos testes são a montagem da chapa dentro de um aquário com uma máquina CNC, instalação do transdutor de ultrassom conectado na eletrônica isolada do PIG, para registro de onda completa de cada trecho observado, e a análise posterior dos dados utilizando um software de análise, com diferentes configurações de detecção das espessuras e distâncias. Dos resultados, obtém-se uma métrica que qualifique a precisão, resolução e erro, para diferentes ensaios.

1.5 – Metodologia

Os métodos empregados neste trabalho utilizam princípios físicos do transporte de ondas sonoras em meios líquidos e metálicos, o conhecimento de desgastes naturais decorridos no tempo em dutos submersos e emersos submetidos à alteração climática, e um software que suporta a implementação de tais algoritmos, para geração de visualizações planejadas de chapas ou dutos em pequena e larga escalas.

Utilizando um software de inspeção do Centro de Pesquisas em Tecnologias de Inspeção (CPTI) em parceria com a PETROBRAS, podemos aplicar isoladamente um algoritmo de detecção em um conjunto de dados, utilizando um determinado conjunto de informações predeterminadas que representem o ambiente configurado para o ensaio.

Primeiramente, serão avaliadas chapas metálicas em laboratório, mostrando o uso da ferramenta com diferentes formas de detecção, disponíveis na forma de plug-ins do software. Os resultados serão apresentados na forma de visualização planejada de um painel com as distâncias da coluna d'água até o transdutor (PIG) e um outro painel contendo a espessura calculada do perfil metálico do duto.

Com as informações processadas, será composto um comparativo de qualidade visual de reconhecimento de irregularidades nas chapas, com a possibilidade de verificação individual do sinal no qual cada ponto foi calculado, exclusivamente.

1.6 – Descrição

O capítulo 2 explicitará as ferramentas utilizadas desde a captura de um sinal de ultrassom, até a complexidade de cada método de processamento, passando pelo software a ser utilizado e pelo formato de dados obtido pela configuração da montagem utilizada para a tomada de medidas.

Após, no capítulo 3, serão mostradas diferentes formas de interpretação do sinal capturado, cada uma com suas vantagens e desvantagens em torno de uma determinada forma de uso.

Com o ambiente configurado e os arquivos consolidados pelos dispositivos de inspeção, os arquivos serão utilizados em análise com os diferentes algoritmos de detecção, no capítulo 4. Serão realizados testes com diferentes abordagens de montagem das chapas e posição dos transdutores. Depois será demonstrado um teste realizado em um duto real, para fins demonstrativos dos métodos e ferramentas.

No capítulo 5, serão apresentadas conclusões sobre os testes e propostas já existentes sobre trabalhos futuros relevantes à criação de novos algoritmos, a otimização dos mesmos e as barreiras encontradas na evolução da tecnologia das técnicas utilizadas.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 - Introdução

2.1.1 - Ultrassom

O início dos estudos sobre a física de sinais de ultrassom data do fim do século XVIII, impulsionada primordialmente pela curiosidade do fisiologista italiano Lazzaro Spallanzani, o primeiro a começar os estudos nesse sentido. Ele deduziu que morcegos utilizavam um sistema de transmissão e detecção de eco para navegar através de obstáculos, uma vez que não possuem visão plena [1].

Diversos outros estudos comprovaram a utilização de sinais de ultrassom por outros animais vertebrados como forma de comunicação e/ou navegação. Um exemplo é a emissão de sons inaudíveis ao ouvido humano por roedores adultos para o aviso de perigo eminente [2]. Outro exemplo são os golfinhos, que também possuem habilidade de comunicação e localização através de ultrassom.

O ultrassom possui este nome por se tratar de uma forma de energia que possui frequências acima do máximo audível humano, que foi verificado em torno de 20 kHz. O escopo de frequências de ultrassom não possui um máximo definido, podendo chegar à faixa de GHz, como em algumas aplicações de telecomunicações.

Trata-se de uma técnica largamente utilizada na medicina, desde a geração de imagens para exames não-invasivos, até o tratamento localizado de lesões por fisioterapeutas. Um exemplo clássico é o ultrassom abdominal, usado por exemplo na inspeção da formação do feto durante a gestação, ilustrado na figura 2.1. Este método realiza uma varredura com o transdutor através do abdômen.



Figura 2.1 - Imagem feita com ultrassom bidimensional (BScan) de um feto com 12 semanas de gestação, para medição de CRL fetal [3].

Em aplicações industriais, o ultrassom é utilizado para realizar a detecção de falhas estruturais durante a manufatura de peças, ou na análise posterior de equipamentos que sofrem desgastes, para detecção de falhas. Uma das vantagens da utilização desta tecnologia está no fato de não haver a necessidade de interrupção de maquinaria, como no caso da inspeção de cascos de navios (figura 2.2) ou de possibilitar exames não-invasivos como o da figura 2.1, dentre outras diversas aplicações.

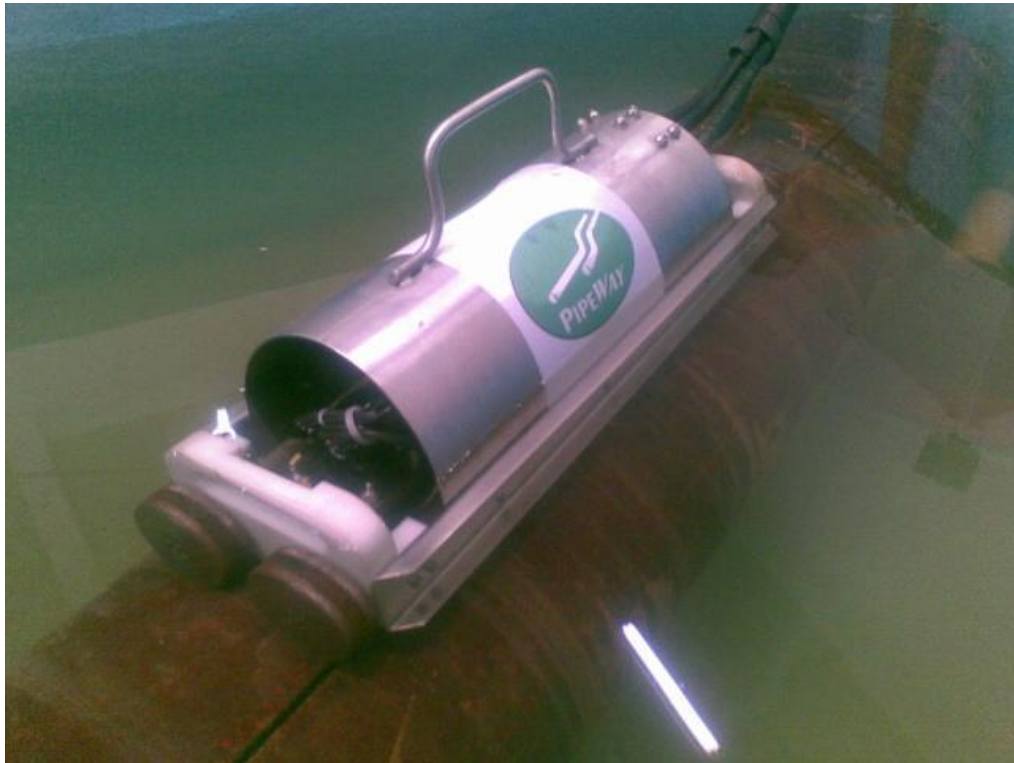


Figura 2.2 - Scanner de ultrassom do CPTI/Pipeway, para medição de espessuras através da superfície externa de dutos ou cascos de navios [9]

2.1.2: Transdutor

O transdutor de ultrassom é um mecanismo específico para conversão de energia sônica em elétrica e vice-versa. É composto internamente por um cristal piezo-resistivo que, ao sofrer uma tensão em seus terminais, apresenta variação em sua largura. Desta forma, ao aplicar uma tensão, esta é transmitida na forma de onda sonora, que geralmente se atenua de maneira subamortecida, oscilando na frequência para o qual foi designado. Igualmente, ao receber um sinal, ele apresenta tensão proporcional em seus terminais. Por este motivo, o dispositivo é um excelente mecanismo para sistemas que utilizam sinais de pergunta/resposta, como é o teste de eco.

O princípio da piezoelectricidade foi primeiro demonstrado em 1880 pelos físicos franceses Jacques e Pierre Currie [5] apud [4]. A figura 2.3 ilustra o efeito.

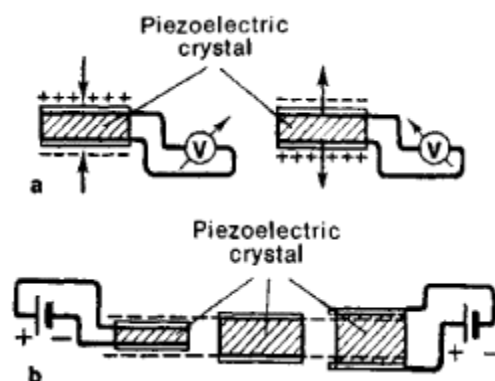


Figura 2.3 - Princípio da piezoresistividade em um cristal. Uma tensão aplicada em dois pontos do sólido produz uma variação do seu comprimento e vice-versa [5]

Para inspeção de dutos de gases, como Gás Natural, utilizam-se transdutores com frequências na faixa de centenas de kHz, enquanto para inspeção de dutos com fluidos como água e óleos, utilizam-se frequências acima de 500 kHz, variando até dezenas de MHz. Normalmente, utiliza-se um único modelo de transdutor, que possui o melhor casamento de impedância acústico com o meio no qual a onda se propaga, reduzindo a atenuação da energia no meio.

Dentre os tipos utilizados industrialmente para análise estrutural, pode-se citar dois tipos de cabeçotes de ultrassom comerciais:

- Cabeçotes com um único cristal (monocristal): Possuem apenas um cristal piezoelétrico em sua montagem, que funciona tanto como transmissor como receptor de ondas;
- Duplo cristal: Possui dois cristais isolados acústica e eletronicamente em um encapsulamento. Um deles é utilizado para transmissão da onda e o outro para recepção, de maneira que qualquer ruído que haja na transmissão não seja detectado no cristal receptor. É utilizado para medição de pequenas espessuras, pois o impulso de tensão inicial não é sentido no receptor. Estes são chamados comumente de SE (*Sender-Empfänger*, em alemão: Transmissor-Receptor);

Em termos de acoplamento do transdutor para realização da medida em questão, tem-se dois tipos:

- *Transdutores de contato* - instalados diretamente na superfície a ser analisada, com um gel acoplador, na detecção de defeitos internos ao duto. Por possuírem

contato direto com a superfície do corpo de inspeção, podem sofrer desgaste com o tempo de uso. Para esse tipo de aplicação, também é comum a utilização de transdutores de duplo cristal;

- *Transdutores de imersão* - Estes são posicionados à uma certa distância do corpo de análise, de maneira que não sofrem o desgaste como o dispositivo citado acima. Utilizam-se tanto monocristais quanto cristais duplos para este tipo de análise;

O modelo utilizado na tomada de dados com scanner e com PIG's é o do *transdutor de imersão*, por facilidade de locomoção do transdutor a fim de realizar testes em movimento. A figura 2.4 demonstra dois transdutores utilizados nos exames de chapas e dutos, com o Scanner do CPTI e PIG's instrumentados, respectivamente. A figura 2.5 demonstra um módulo de PIG Ultrassônico em desenvolvimento.



Figura 2.4 - Transdutores de imersão de 5MHz e de 15MHz, respectivamente, da esquerda para a direita. São utilizados para inspeção de corrosão de dutos com Scanner e PIG's



Figura 2.5 - Módulo com sensores de um PIG Ultrassom, para mapeamento de espessura do perfil metálico de dutos

2.2 – AScan

Amplitude Scan ou simplesmente AScan, é uma forma de sinal elétrico modulado em amplitude, representando cada vibração mecânica do cristal piezelétrico. De forma geral, é o sinal de uma dimensão lido nos terminais do transdutor ultrassônico. O BScan, por exemplo, pode ser feito a partir de vários AScans, como a varredura mostrada na figura 2.1. Este é o sinal processado em aplicações em que se utilizam transdutores como os mencionados acima, na seção 2.1.

Inicialmente, com o transdutor instalado e acoplado com o corpo de teste, aplica-se um impulso de tensão com uma frequência predeterminada em seus terminais, o qual é chamado de “*Bang*”. Depois de aplicado o impulso, a energia da onda transmitida deverá ser: absorvida pelos meios materiais, refletida nas interseções líquido/metal, interseções entre diferentes metais, invertendo então sua fase de onda, ou se propagando através das interfaces e continuando o trajeto. Cada reflexão que volta ao cabeçote é chamada de Eco.

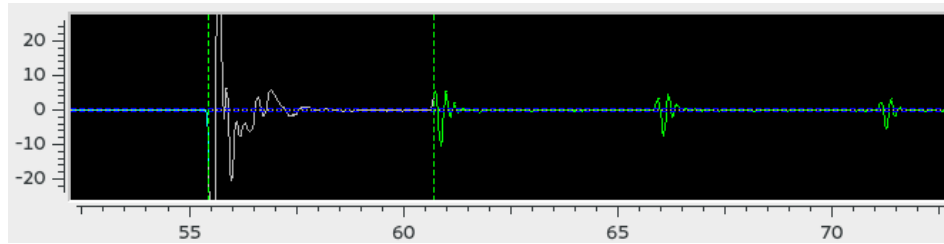


Figura 2.6 - AScan de uma chapa metálica utilizando um transdutor de imersão de 5MHz, submerso em água (acoplante). As unidades e grandezas das figuras de AScan como a acima estão definidas abaixo.

O sinal representado na figura 2.5 possui as seguintes características:

- O Eixo vertical representa a tensão mostrada nos terminais do transdutor, em porcentagem relativa ao maior número registrado no conversor A/D;
- O Eixo horizontal representa o tempo decorrido da leitura, desde o momento de início de aquisição, em microssegundos;
- O primeiro eco determina, neste caso, 2 vezes o tempo que a onda demorou para viajar do cabeçote até a interface água/metal, chamado propositalmente de *coluna d'água*;
- Cada eco subsequente de menor amplitude representa a distância de viagem da onda que trafega no meio líquido, trafega pelo objeto metálico e é refletido em sua interface externa, voltando em direção ao transdutor novamente, percorrendo mais uma vez o meio líquido. A onda reverbera em meio metálico com maior velocidade do que no líquido, portanto tem-se respostas em menor período que as ondas que reverberam somente no meio líquido;
- Caso houvesse um eco de amplitude mais elevada que os anteriores, haveria a repetição do Eco da coluna d'água. Isto acontece na maioria das vezes que o transdutor é posicionado muito próximo do objeto inspecionado, diminuindo o tempo de reverberação da coluna d'água (vide ensaio 4.3, com transdutor posicionado inicialmente a 2mm do alvo);

Com a leitura do sinal concluída, e conhecendo-se os meios pelos quais a onda trafegou, pode-se determinar a distância da coluna d'água entre o transdutor e o objeto e a espessura do mesmo a olho nu, como será explicado na seção 3.2.

Capítulo 3

Algoritmos de Detecção de Ecos em AScan

3.1 - Introdução

Diferentes formas de AScan surgem em decorrência de condições especiais ocorridas em um ensaio, sendo o reconhecimento e a correta identificação de eventos a principal tarefa do analista. Daí a importância desta classe de algoritmos, para que não haja indução a erros na leitura de eventos por conta de mal processamento de dados.

Diferente de sistemas onde a captura e o processamento ocorrem diretamente via hardware, neste trabalho temos como principais metas a velocidade de aquisição e a resolução dos dados. Por isso, somente a aquisição é feita via hardware, enquanto o processamento é delegado à análise computacional posterior via software. Com isso ganha-se a diminuição da carga de hardware durante a operação de inspeção, custo este que pode ser revertido em um aumento da velocidade da captura de dados, desta forma aumentando o número de pontos por AScan ou aumentando a redundância de capturas, para correção posterior de falhas.

Com esta estratégia, temos também a opção de selecionar o algoritmo que será mais vantajoso na detecção de um determinado conjunto de dados. Existem algoritmos à disposição do analista que combinam as técnicas explicadas neste capítulo para gerar o resultado mais próximo da situação real da chapa.

As seções do capítulo presente baseiam-se em pesquisas e experiências realizadas por pesquisadores do Centro de Pesquisa em Tecnologias de Inspeção (CPTI), presentes no artigo publicado na Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção (Abendi) [10].

O pseudo-código referente a cada um dos algoritmos referidos neste capítulo estão presentes na seção de Apêndice.

3.2 - Problemas na detecção

Diversas situações atrapalham medições feitas utilizando-se transdutores de ultrassom. A seguir são apresentados alguns exemplos de formas de contornar as que são verificadas com maior frequência:

- Para fazer a medição corretamente, é necessário que superfície do transdutor e a da chapa em questão estejam alinhadas perpendicularmente, como na figura 3.1, ou, então, parte da onda transmitida pode se dispersar e não retornar ao cabeçote, como ocorre internamente na presença de corrosão alveolar na parede oposta à da medição ou quando o transdutor de contato está instalado em superfícies rugosas.

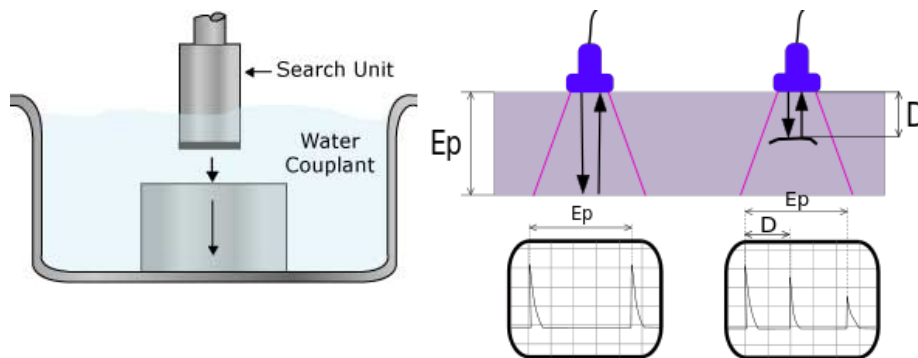


Figura 3.1 - Acoplamento perpendicular para transdutores de imersão e contato, respectivamente

- Transdutores SE possuem a vantagem de realizar medições de chapas de 1mm ou menos. O problema que se enfrenta com eles é o fato de serem fabricados para acoplamento direto à peça, o que o sujeita a erros por acoplamento em superfícies rugosas e o desgaste do material.
- A presença de pintura e/ou corrosão superficial gera condições ruins para a leitura de ecos. Uma solução largamente utilizada é o registro de onda completa (AScan), que torna possível a interpretação de “ecos de fundo”. Assim eliminam-se possíveis erros ocasionados no início do sinal. Este artifício baseia-se no fato da velocidade da onda sônica em meio sólido ser mais rápida que em

líquido. Por isso, tem-se a repetição dos ecos provenientes da interface interna metálica com maior frequência que os ecos de interface externa ao sólido. Assim, se o sinal for bem condicionado, é possível utilizar a média entre os “ecos de metal” para o cálculo da espessura.

- O baixo ganho do sinal devido à perda/atenuação também ocorre, e não pode ser imediatamente remediado aumentando-se a escala ou o ganho da eletrônica, pois igualmente amplificadas seriam as ondas subsequentes de amortecimento do eco, aumentando a “zona morta” para detecção de um outro eco subsequente.
- Em chapas com espessura menor que 10 mm, utilizam-se transdutores de 10MHz ou mais, para um amortecimento rápido o suficiente para não que não haja colisão do primeiro eco de metal com o da coluna d'água. O problema destes dispositivos, porém, é a atenuação de ondas sônicas em determinados materiais. A figura 4.4 demonstra uma sobreposição de ecos, impossibilitando o cálculo de medida.
- Uma forma de se reduzir ruídos aleatórios do sinal é tomar várias medidas em um mesmo ponto e calcular a média do sinal, eliminando-se ruídos de média 0 e distribuição uniforme. Aqui, o problema está no custo de hardware para tomar várias medidas em um mesmo ponto, aumentando o tempo de aquisição e diminuindo a velocidade da inspeção, conseqüentemente.

Com as características e condições listadas acima, os ensaios terão o seguinte cenário no processamento dos sinais:

- Registro de onda completa (AScan);
- AScan sem cálculo de média, ou pontos condensados, onde escolhe-se a melhor amostra por critério a ser escolhido em configuração do programa;
- Transdutores de imersão monocristais, como os da figura 2.4, em uma montagem como a figura 2.8. As frequências variam entre 5 e 15 MHz;

- Cabeçotes focalizados, para concentração pontual de energia e favorecimento do retorno de ecos em casos de superfícies corroídas;
- Sinal registrado apenas após uma margem após o bang inicial (*deadzone*), determinada pela eletrônica do PIG Ultrassom, reduzindo a quantidade de dados durante a aquisição;

3.3 - Análise a olho nu e cálculo direto

Os cálculos da Coluna d'água e da espessura da peça podem ser feitos diretamente obtendo-se o tempo entre dois ecos de interface entre o sólido e a água. O primeiro eco é chamado de Coluna d'Água e os subsequentes são os de metal.

O valor da espessura é dado pela metade do produto entre a diferença dos tempos medidos de dois ecos subsequentes ($t_{Eco\ n+1} - t_{Eco\ n}$) e a velocidade em que a onda trafega no meio em questão (v_{meio}), onde $t_{Eco\ n+1} > t_{Eco\ n}$ (Eq. 3.1). Para a coluna d'água, considera-se o tempo de primeiro eco $t_{Eco\ n} = 0$, que representa o impulso inicial de tensão (não presente nos AScans pelo fato da aquisição ser iniciada após uma zona morta).

Com sucessivos ecos de metal, é possível realizar o cálculo da espessura através de uma média, obtendo-se cada diferença entre os tempos medidos para cada eco de metal. Este procedimento será ilustrado nesta mesma sessão, para o AScan demonstrado na figura 3.2.

A tabela 3.1 possui alguns dos valores medidos experimentalmente para a velocidade do som em diferentes materiais.

$$\text{Coluna d'água} = 1/2 \cdot (t_{Eco\ n+1} - t_{Eco\ n}) \cdot v_{meio}[\text{m}] \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Tabela 3.1 - Velocidade do Som em diferentes materiais [6]

Meio	Velocidade (m/s)
Vidro	3962
Vidro, Pyrex	5640
Ferro	5130
Aço	6100
Aço, inoxidável	5790
Água	1433

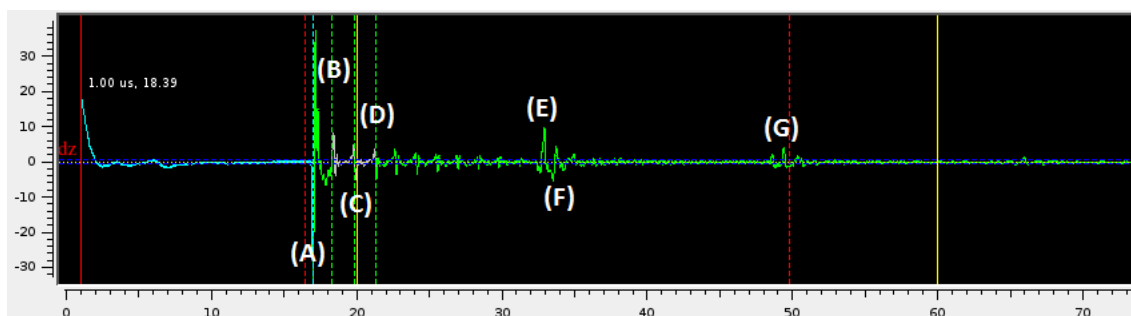


Figura 3.2 - O AScan acima possui um deadzone do *Bang* é de 1us, e as colunas d'água e espessura registradas são de 12,74mm e 4.51mm. (A) representa o primeiro eco de coluna d'água, (B), (C) e (D) representam ecos de metal referentes à primeira coluna d'água, (E) é o segundo eco de coluna d'água, próximo do primeiro eco de metal (F) subsequente. (G) é o terceiro eco de coluna d'água.

```

Canal: 1
Posição: 141 mm
Líquido: 12.74 mm
Metal: 4.30 mm
Timestamp: 1970-01-01 00:00:00.019
Orientação: -
Velocidade: -
Condens.: 1
Interpol.: Não
Aproximado: Não
Mensagem: -

```

Figura 3.3 - Informações obtidas para a amostra da figura 3.2

No AScan de exemplo da figura 3.2, as distâncias foram feitas com os seguintes dados:

Coluna d'água: $t_{EcoCD} = 16.99 \text{ us}$, $v_{\text{Água}} = 1500 \text{ m/s}$:

$$l_{CD} = 1/2 \cdot 16,99 \cdot 10^{-6} \cdot 1500 = \mathbf{12,74 \text{ mm}}$$

Espessura do metal (média):

$t_{Eco1} = 18,28 \text{ us}$, $t_{Eco2} = 19,85 \text{ us}$, $t_{Eco3} = 21,29 \text{ us}$, $v_{\text{metal}} = 6000 \text{ m/s}$;

$$l_1 = 1/2 \cdot (18,28 - 16,99) \cdot 10^{-6} \cdot 6000 = \mathbf{3,87 \text{ mm}};$$

$$l_2 = 1/2 \cdot (19,85 - 18,28) \cdot 10^{-6} \cdot 6000 = \mathbf{4,71 \text{ mm}};$$

$$l_3 = 1/2 \cdot (21,29 - 19,85) \cdot 10^{-6} \cdot 6000 = \mathbf{4,32 \text{ mm}};$$

$$l_M = \frac{1}{3} \cdot \sum_{N=1}^3 l_N = \mathbf{4.30 \text{ mm}};$$

Os métodos de detecção apresentados a seguir utilizam 4 parâmetros em comum, utilizados para reduzir o número de anomalias em inspeções. Estes variam de acordo com as dimensões do alvo e dos tipos de transdutores utilizados:

Deadzone1 (d_1) - Tempo de espera imediatamente após o Bang, chamado de *zona morta* de detecção. Nenhuma detecção é feita neste intervalo. Está associado com a distância entre o transdutor e a primeira superfície de metal (interna ao duto);

Janela1 (w_1) - Janela de tempo dentro na qual espera o surgimento do primeiro eco (coluna d'água). Este valor se associa à máxima distância entre o transdutor e a primeira superfície de metal;

Deadzone2 (d_2) - Tempo de espera após a detecção do primeiro eco, que representa a espessura mínima do metal avaliado, onde não se deve esperar por outro eco enquanto ocorre o amortecimento do cristal;

Janela2 (w_2) - O intervalo de tempo para a procura de um segundo eco, associado à espessura máxima do metal;

Estes parâmetros delimitam a espessura mínima/máxima e coluna de água da chapa/duto.

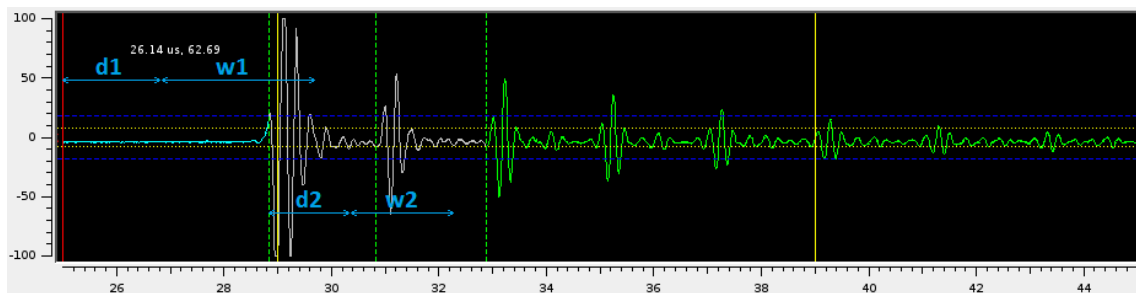


Figura 3.4 - Parâmetros utilizados na detecção de ecos.

3.4 - Detecção por Limiar Estático

Esta forma de detecção é um dos métodos mais simples dentre os algoritmos a seguir. Possui instruções simples e rápidas para a detecção.

Dentro das janelas de procura w_1 e w_2 , procura-se por valores detectados acima de um limiar prestabelecido para cada janela, marcando um eco na primeira ocorrência.

Por sua simplicidade e facilidade de implementação, este método é largamente utilizado em sistemas de detecção em tempo real. Em alguns sistemas, é implementado em hardware, devolvendo o resultado diretamente na forma de medidas.

Se por acaso o valor de limiar for superdimensionado, como na figura 3.5, ecos com amplitude atenuada por conta de perda de energia podem passar sem detecção, o que ocorre em regiões com corrosão presente. No outro caso, quando o limiar é subdimensionado, existe a detecção de falsos ecos por conta de ruídos ou amortecimento lento.

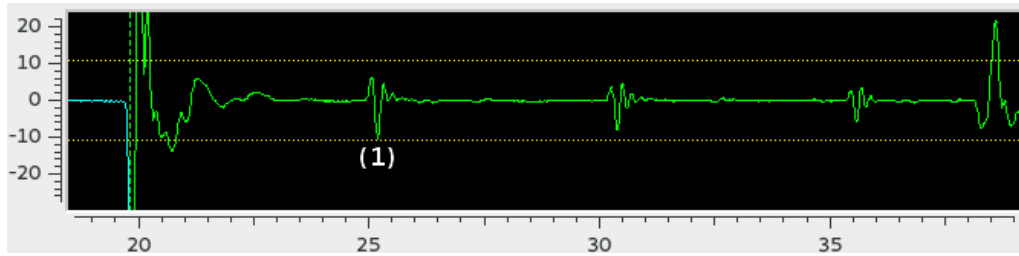


Figura 3.5 - Limiar estático para ecos de metal superdimensionado, portanto primeiro o eco da superfície de metal (1) e os seguintes não puderam ser detectados.

Este algoritmo encontra-se em anexo na seção de Apêndice A.

3.5 - Detecção por Pico Absoluto

Nesta forma de detecção, ao invés de detectarmos ecos assim que o sinal ultrapassar um determinado limiar, busca-se o ponto de maior amplitude absoluta dentro de cada janela de captura.

Dessa maneira, reduz-se o problema existente quando o sinal possui baixos níveis de amplitude, flexibilizando a margem de ganho da instrumentação e consequentemente melhorando o resultado de ensaios onde sabidamente exista presença de superfícies corroídas.

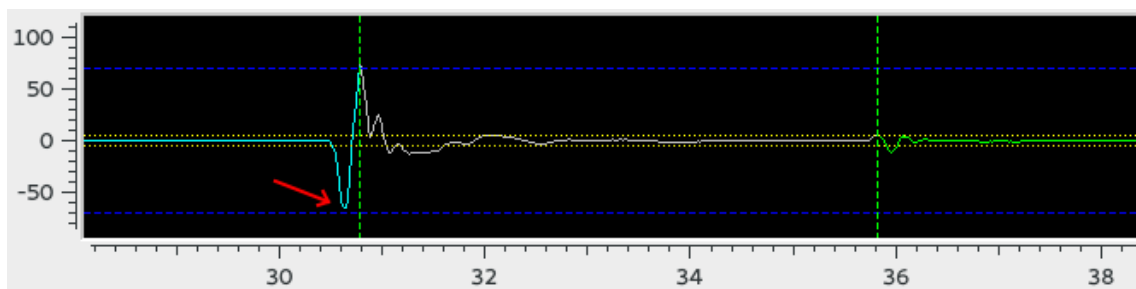


Figura 3.6 - Detecção do primeiro eco no ciclo positivo (de maior amplitude absoluta) e não no ciclo negativo, apontado pela seta vermelha, causando um cálculo de espessura de 15,12mm ao invés de 15,78mm (um erro de aprox. 4%)

Neste método, porém, existe o problema de sempre haver detecção de dois ecos, mesmo que não haja, criando uma medida inexistente. Outro caso também possível é o alargamento/deformação dos ecos, causando a detecção do eco em um ciclo errado, como na figura 3.6.

Este algoritmo encontra-se em anexo na seção de Apêndice B.

3.6 - Detecção por Flancos (ou Limiar Dinâmico)

Este tipo de detecção procura utilizar o melhor dos métodos descritos anteriormente, utilizando limiar e pico absoluto para detecção de ecos.

Inicialmente, procura-se pico de maior amplitude absoluta dentro da primeira janela de captura w_1 . A partir dessa detecção, dentro de uma nova janela w_1' , de largura pré-definida, volta-se buscando o primeiro valor que excede um novo limiar de amplitude, relativo ao primeiro. Este, então, será o eco do qual a detecção irá continuar, respeitando a mesma deadzone de metal d_2 , a janela w_2 , e o procedimento descrito, criando-se uma nova janela w_2' , voltando do eco de maior valor absoluto encontrado. A figura 3.7 mostra o mesmo AScan da figura 3.6, utilizando este método.

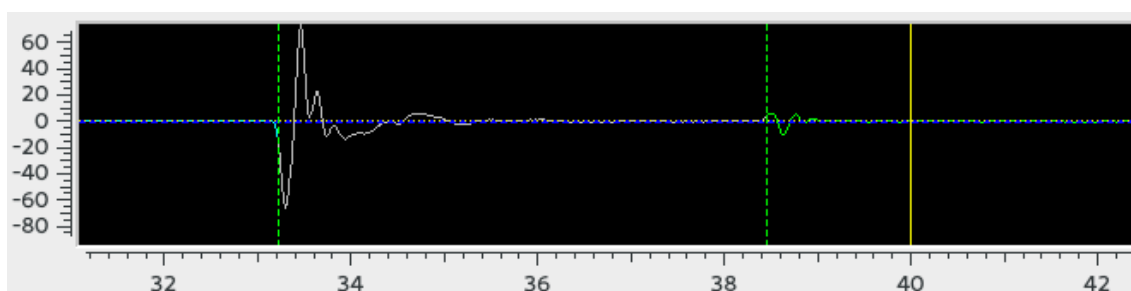


Figura 3.7 - Detecção por flancos. Este método obteve uma medida de 15,05 mm e o de picos absolutos obteve 14,88 mm, para um alvo de 15 mm. Respectivamente, os erros percentuais para esta medida foram de 0,80% e 0,33%

Um inconveniente deste método é a adição de mais 3 parâmetros de configuração w_1' , w_2' e a nova razão de proporção dos flancos, que tornam o processo de otimização de variáveis mais complexo e sensível para cada análise feita.

Este algoritmo encontra-se em anexo na seção de Apêndice C.

Capítulo 4

Testes

4.1 - Introdução

Com o uso dos algoritmos descritos no capítulo 3, as ferramentas descritas no capítulo 2 e um software de análise, foram realizados testes em ambiente laboratorial e em campo para medição de espessuras de diferentes objetos de estudo.

Serão descritos os materiais que compõem a peça, suas medidas relevantes, a calibração do teste (quando necessária), e o procedimento utilizado na tomada de cada teste.

A cada corrida, calibram-se as velocidades do som no líquido e no metal, para os cálculos corretos de distância e espessura.

Em cada ensaio, foram utilizados cada um dos algoritmos estudados para comparação de desempenho. Serão analisadas estatísticas como:

- O tempo total de execução do algoritmo (utilizando sempre um mesmo computador, com 8 núcleos de CPU e 8 GB de memória RAM);
- A porcentagem de detecções no caso de Limiar Estático;
- O erro de medida no caso de detecção de chapas de espessura uniforme;
- Dificuldades encontradas;

O código apresentado na seção de apêndices foi originalmente desenvolvido na linguagem C++, utilizando o framework Qt[13], com a divisão do buffer de dados de AScan entre os núcleos de CPU da máquina, para realização do processamento de forma paralelizada.

Cada unidade de tempo é calculada em nano segundos individualmente por cada thread, desde o instante em que a chamada de algoritmo é iniciado até o seu retorno.

4.2 - Montagem para inspeção de objetos no aquário

Os ensaios em laboratório foram realizados utilizando a montagem da figura 4.1, que mostra a máquina CNC para o posicionamento do transdutor dentro do aquário de acrílico.

Primeiro insere-se o objeto no fundo, preenche-se de água até um determinado nível que garanta que o transdutor instalado no soquete da máquina CNC não emergja da superfície. Inicia-se a eletrônica para aquisição de sinais e executa-se o script de roteamento do cabeçote sobre a peça.

A eletrônica é iniciada via interface web, para configuração e exibição do estado de aquisição em tempo real.



Figura 4.1 - Aquário para realização de testes com a eletrônica de ultrassom no CPTL.

4.3 – Alvo de 15 mm

O objetivo deste ensaio é o de avaliar cada algoritmo de forma quantitativa, medindo um alvo de espessura conhecida e calculando o desvio normalizado RMS dos valores observados.

Características:

- Material: Bloco em aço inoxidável, para testes com transdutores e scanner de ultrassom no CPTI;
- Medidas: 15 mm de espessura
- Transdutores utilizados: Foi utilizado um transdutor de imersão, de 5 MHz de portadora, com frequência de amostragem 100 MHz;
- Calibração: O transdutor foi instalado em uma máquina CNC (montagem de testes na figura 4.1.
- Ganho da eletrônica: 0 dB;
- Instalação: Foi fixado no fundo aquário com coluna água suficiente para cobrir o transdutor e o bloco durante todo o teste. O transdutor estava focado no centro do bloco, acima da peça da figura 4.2;
- Tomada de dados: A partir de uma distância de 2 mm, e a cada degrau de afastamento de 0,5 mm do transdutor, era gerada uma nova amostra;
- Cada AScan possui 8150 pontos.
- Número de amostras: 102

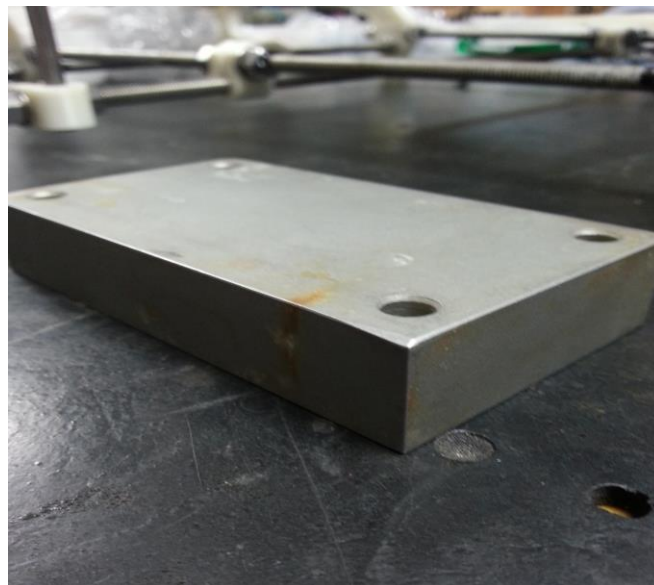


Figura 4.2 - Alvo em aço, com 15 mm de espessura, para testes na piscina

Configuração de limites para os algoritmos:

Tabela 4.1 - Limites físicos do ensaio com alvo de 15 mm

	Coluna d'água [mm]	Espessura [mm]
Mínima	1	11
Máxima	60	18

Resultados:

Tabela 4.2 - Resultados para o Alvo de 15 mm. O erro é dado em função da raiz dos desvios médios quadráticos

Algoritmo	Tempo Total de Detecção [ms]	Tempo de detecção / amostra [ms]	2+ Ecos / 1 Eco / Falhas*	Espessura média [mm]	Erro (NRMSD)
Limiar Estático	4,508854	0,044204	98,04 % / 1,96 % / 0 %	14,78	1,45%
Picos Absolutos	47,891198	0,4695212	-	14,85	1,00%
Limiar Dinâmico	80,035234	0,784660	-	14,93	0,46%

*O número de Detecções de 2+ Ecos/1 Eco/Falhas referem-se somente ao primeiro algoritmo, uma vez que os demais sempre encontram 2+ Ecos.

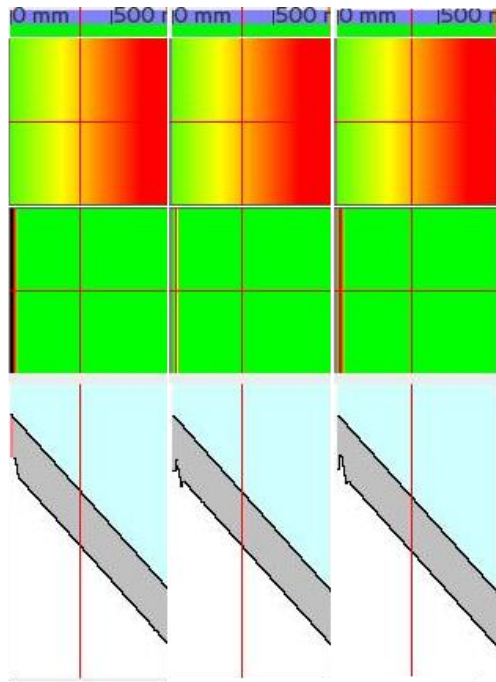


Figura 4.3 - Da esquerda para a direita - Detecção por Limiar estático, Picos absolutos e Flancos. De cima para baixo os quadros representam: as distâncias entre o transdutor e o alvo, as espessuras calculadas e os cortes longitudinais da peça

Detalhes:

Para o algoritmo de Limiar estático, foi utilizado um limiar de 50% de amplitude mínima para a detecção do primeiro eco e outro de 5% para detecção de ecos de metal;

Para o de Limiar Dinâmico, foi utilizado um limiar mínimo de 30% relativo ao pico absoluto, para detecção de ecos na janela de flancos, que possui largura de 4 períodos de amortecimento do transdutor.

Pela proximidade inicial do transdutor com o alvo, os ecos de coluna d'água se sobrepuseram aos ecos de metal iniciais, dificultando a detecção de espessura no início da análise, vide figura 4.4 abaixo.

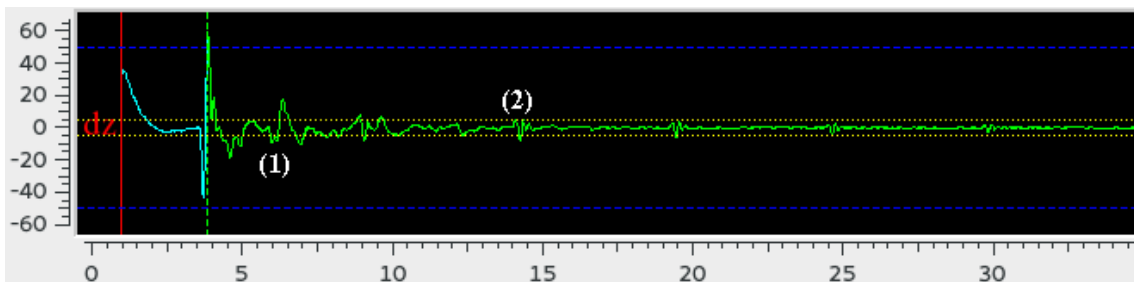


Figura 4.4 - Repetição de eco de coluna d'água (1) sobrepondo primeiros ecos de metal, relativos à 1ª coluna d'água. (2) é um eco de coluna d'água

4.4 – Chapa CPTI

Esta chapa foi desenvolvida pelo CPTI para realização de testes com ultrassom no laboratório. Com ela, é possível analisar qualitativamente a imagem gerada pelo programa e quantitativamente, medindo-se o erro médio de cada seção específica de profundidade diferente.

A chapa possui a seguinte estrutura da figura 4.5.

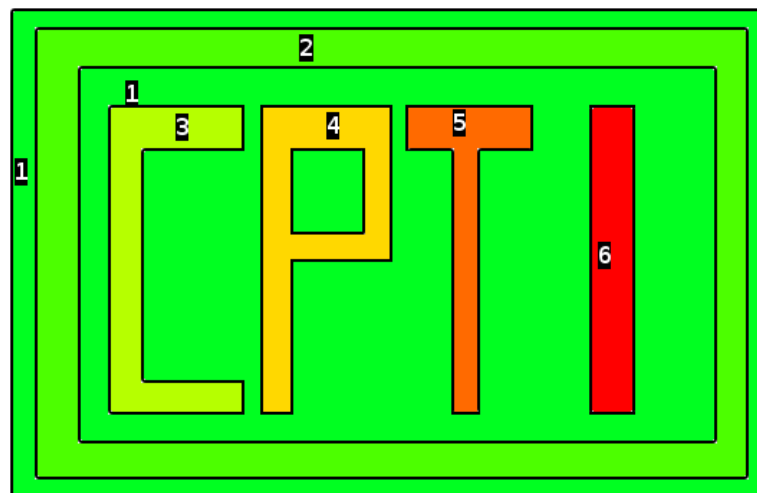


Figura 4.5 - Seções da chapa CPTI

A chapa possui as seguintes medidas, seguindo a legenda numérica da Figura 5.5:

Tabela 4.3 - Espessuras para regiões delimitadas da Chapa CPTI

	Fundo	Borda	C	P	T	I
Espessura [mm]	16,1	14,45	12,85	9,70	6,60	3,40

Características:

- Material: Bloco em aço-carbono, para testes com transdutores e scanner de ultrassom no CPTI;
- Instalação: Foi fixado no fundo aquário com coluna água suficiente para cobrir o transdutor e a chapa durante todo o teste;
- Transdutores utilizados: Transdutor de imersão de 15 MHz, com sinal amostrado em 100 MHz;
- Calibração: O transdutor foi fixado no soquete máquina CNC;
- Ganho da eletrônica: 0 dB;
- Tomada de dados: A máquina CNC foi programada para tirar uma amostra por passo de motor, em cima da chapa.
- Cada AScan possui 8100 pontos;
- Número de amostras: 56462



Figura 4.6 - Chapa metálica com diferentes espessuras para testes de medição no CPTI.

Configuração de limites para os algoritmos:

Tabela 4.4 - Limites de algoritmos para a chapa CPTI

	Coluna d'água [mm]	Espessura [mm]
Mínima	6	5,6
Máxima	20	18

Observação: A espessura mínima de metal configurada para detecção selecionada é maior que a mínima real medida na chapa, por conta do alargamento de eco presente em todo este ensaio. Caso este valor fosse escolhido como menor ou igual a 3,4 mm, a detecção em todos os algoritmos mostraria uma espessura menor que a esperada em diversos trechos, piorando em muito a visualização geral da chapa.

Resultados:

Tabela 4.5 - Resultados para Chapa CPTI

Algoritmo	Tempo Total [ms]	Tempo / amostra [ms]	2+ Ecos / 1 Eco / Falhas
Limiar Estático	928,849168	0,016451	80,36% / 9,11% / 10,53%
Picos Absolutos	17357,886865	0,3074261	-
Limiar Dinâmico	17684,636548	0,3132131	-

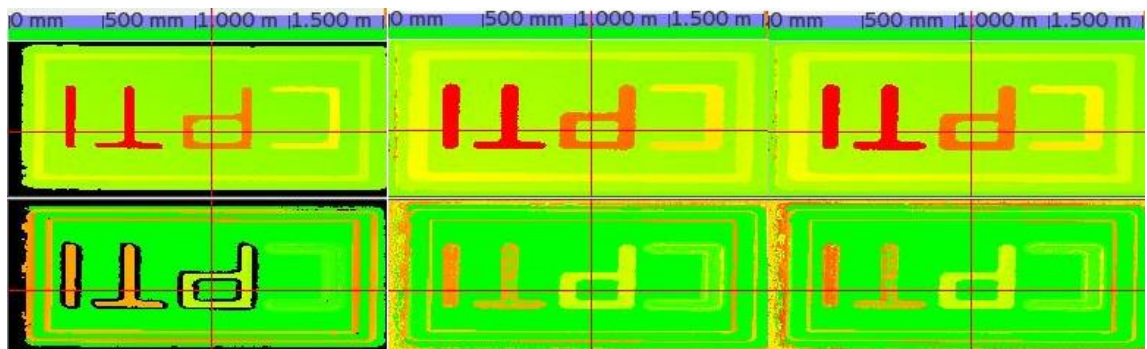


Figura 4.7 - Colunas d'água e espessuras, da esquerda para direita: Limiar estático, Picos Absolutos, Flancos



Figura 4.8 - Da esquerda para direita - Cortes longitudinal e lateral para: Limiar estático, Picos Absolutos, Flancos

Tabela 4.6 - Medidas calculadas dos pontos de observação da chapa CPTI

Algoritmos	Fundo [mm]	Borda [mm]	C [mm]	P [mm]	T [mm]	I [mm]	Erro [%] (NRMSD)
Medido	16,10	14,45	12,85	9,70	6,60	3,40	-
Limiar Estático	16,15	14,60	12,93	9,77	6,52	6,44	7,87%
Picos Absolutos	15,95	14,40	12,76	9,60	6,44	5,81	6,93%
Deteção por Flancos	16,15	14,57	12,88	9,71	6,55	5,09	5,54%

Detalhes:

A detecção da letra “I” da chapa foi prejudicada pelo limite inferior de espessura, acima do valor real medido. Uma vez acertado o limite para detectar corretamente o trecho, todos os outros foram prejudicados, por encontrarem uma espessura menor que a real observada, deixando a visualização com “buracos”.

4.5 – Rotor com corrosão e furos não-passantes

O objetivo deste ensaio foi monitorar uma chapa, como se faria em um casco de navio, com o scanner do CPTI. O ensaio foi registrado para posterior análise, ainda que a inspeção tenha sido feita em tempo real de inspeção.

Características:

- Material: Disco em aço-carbono construída e corroída para uso em testes, em uma mesa giratória;
- Medidas: 6,79 mm de espessura, com furos não-passantes de até 4,45 mm;
- Instalação: O Rotor foi fixado no fundo aquário, com coluna d'água suficiente para cobrir o scanner;
- Transdutores utilizados: Scanner de ultrassom, com 64 canais de transdutores de imersão, cada um com 15 MHz de amortecimento, e uma amostragem de 100 MHz;
- Calibração: O Scanner possui uma distância de 10 mm entre canais, sendo 3 fileiras de sensores, deslocadas 5 mm entre si.
- Tomada de dados: o Scanner foi passado de baixo para cima 6 vezes, apoiado sobre a chapa, travando-se o hodômetro na volta para que não houvesse condensação de pontos sobre a mesma coordenada;
- Cada AScan possui 700 pontos;
- Número de amostras: 63293;



Figura 4.9 - Rotor com furos visíveis para testes com ultrassom.

Resultados:

Tabela 4.7 - Resultados para o Rotor

Algoritmo	Tempo Total [ms]	Tempo / amostra [ms]	Falhas / 1 Eco / 2+ Ecos
Limiar Estático	1009,72141	0,01595	56.70% / 11.08% / 32.22%
Picos Absolutos	7107,93645	0,11230	-
Limiar Dinâmico	7102,51251	0,11221	-

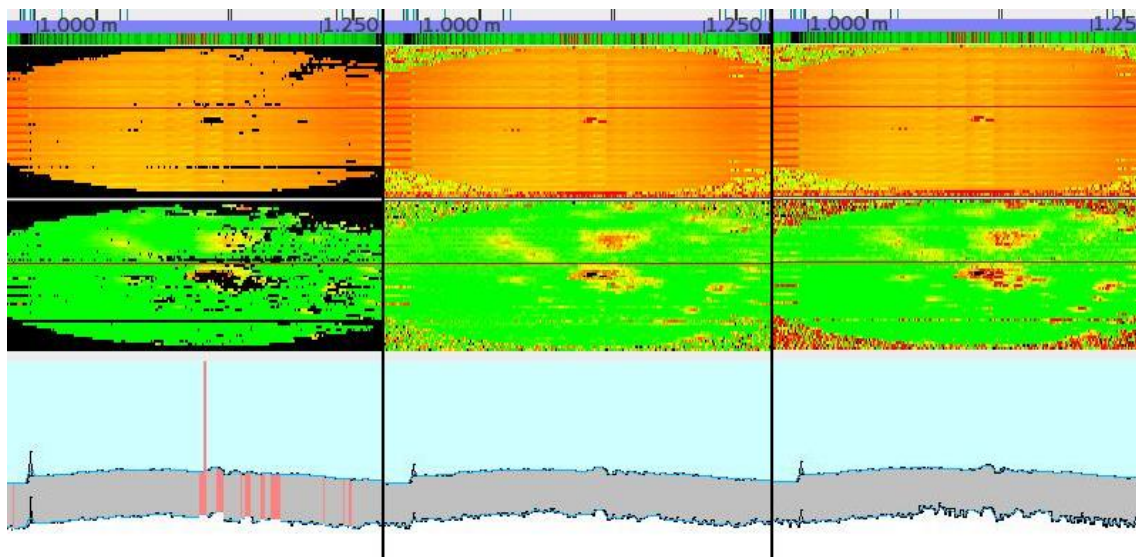


Figura 4.10 - Vista da chapa com corte longitudinal. Da esquerda para a direita: Limiar Estático, Picos Absolutos e Flancos

Destaques:

Pela forma de detecção dos algoritmos por picos e flancos, o fundo escuro observado no limiar estático (fora do rotor) não está presente, portando estas regiões não devem ser levadas em consideração, uma vez que suas medidas são sistematicamente errôneas.

É possível observar os buracos com precisão nos algoritmos de picos absolutos e flancos, enquanto por limiar estático, eles são estão confusos por perdas na detecção. O furo do rotor não existe nestes, porém.

O corte longitudinal possui uma inclinação causada pela movimentação do scanner por cima do rotor, que afundou o trilho de passagem do scanner nos cantos, dando a impressão que o rotor é curvado.

4.6 – Corrida em duto real com PIG instrumentado com sensores ultrassom

Neste ensaio, temos um trecho de corrida de PIG instrumentado com sensores ultrassom em diferentes dutos de testes conectados entre si montando um percurso

único sem derivações. A meta é identificar os eventos de conexão e solda dos dutos, que estão íntegros e com pouca/nenhuma corrosão. Todos eles foram construídos em aço.

Características:

- Material: Diferentes seções, todas em aço;
- Medidas: Trecho de 65 metros;
- Transdutores utilizados: PIG Ultrassom de 64 canais de 15 MHz; desenvolvido pelo CPTI para uso em duto de testes;
- Calibração: PIG calibrado para análise em duto de 56mm de espessura, em média;
- Tomada de dados: Pré-configurado para missão em que rodou por 200m de dutos, em 42 minutos;
- Cada AScan possui 2000 pontos;

Parâmetros de configuração do algoritmo:

Tabela 4.8 - Limites para dutos de testes

	Coluna d'água [mm]	Espessura [mm]
Mínima	5	8
Máxima	20	12

Resultados:

Tabela 4.9 - Resultados para dutos reais

Algoritmo	Tempo Total [ms]	Tempo / amostra [ms]	Falhas / 1 Eco / 2+ Ecos
Limiar Estático	1009.72141	0.01595	86.93% / 2.02% / 11.06%
Picos Absolutos	7107.93645	0.11230	-
Limiar Dinâmico	7102.51251	0.11221	-

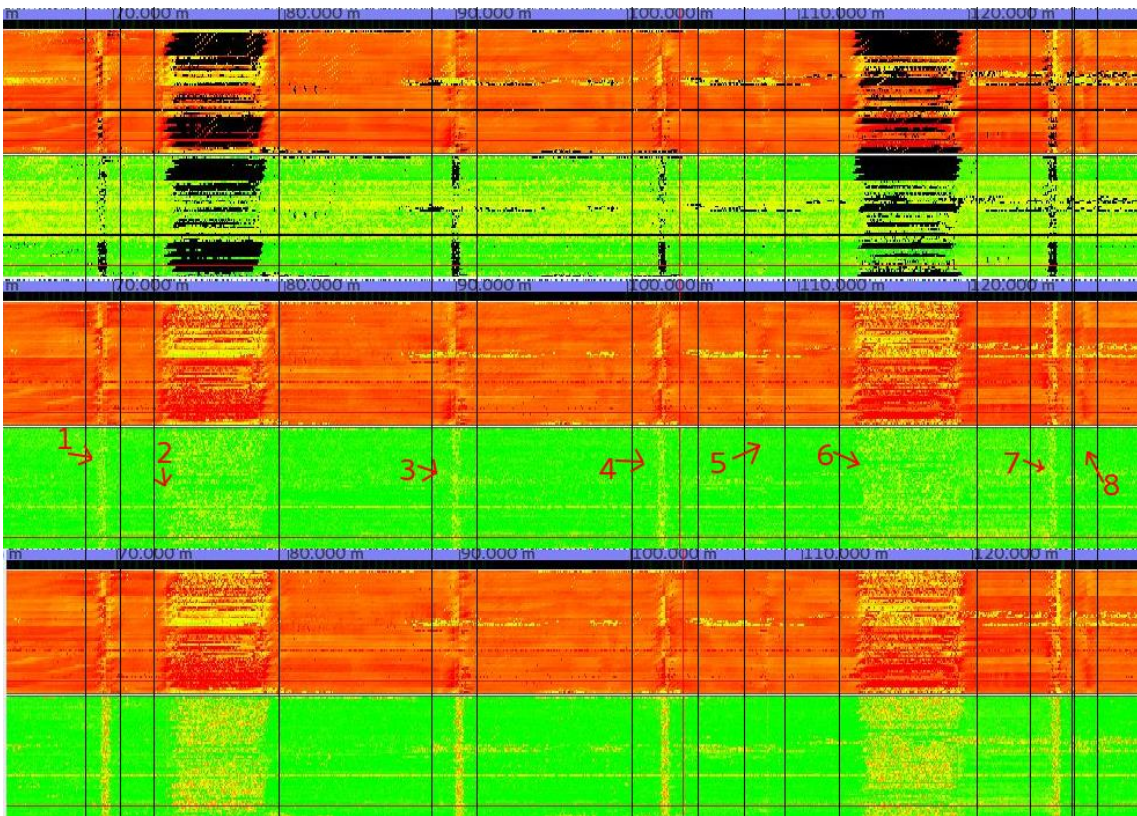


Figura 4.11 - Chapas de coluna d'água e espessura. De cima para baixo: limiar estático, picos absolutos e detecção por flancos

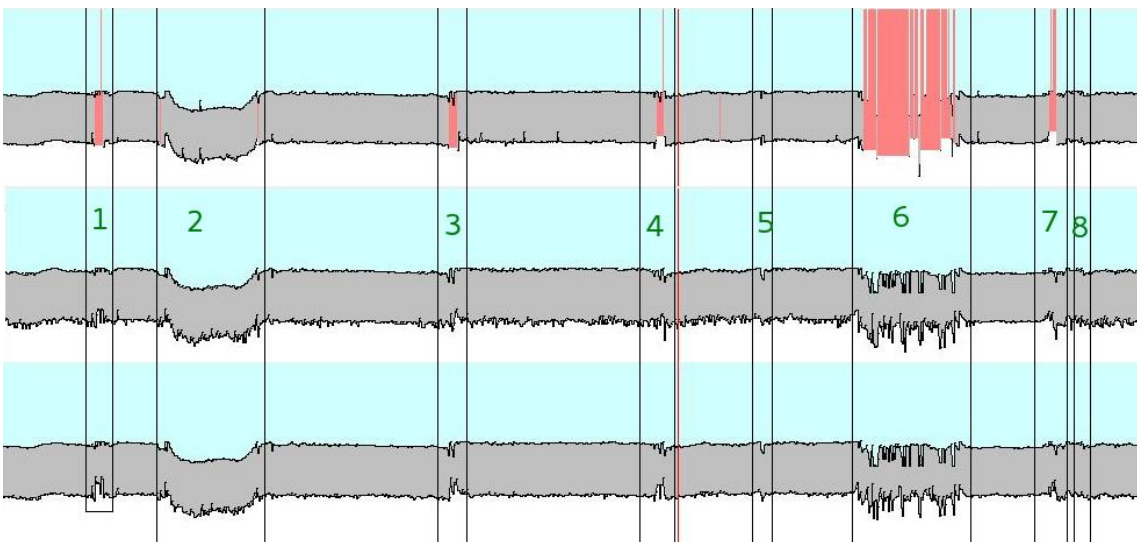


Figura 4.12 - Cortes da corrida real. De cima para baixo: limiar estático, picos absolutos e detecção por flancos

Detalhes:

As legendas numéricas inseridas nas vistas de corte e chapa das figuras 4.11 e 4.12 indicam os seguintes eventos:

1, 3, 4 e 7 - Flanges;

5 e 8 - Soldas;

2 e 6 - Curvas;

Curvas são facilmente reconhecíveis em inspeções por causarem erros de detecção em PIG's instrumentados ambos com palitos ou ultrassom. Erros estes que são causados por ação centrípeta, que os desloca no sentido oposto ao raio da curva.

Os buracos observados durante as curvas no limiar estático se devem ao distanciamento dos sensores em relação a um dos lados do duto. Os algoritmos de picos e limiar dinâmico detectam pontos mais rasos e mais fundos, dependendo da orientação do canal, ainda que bastante ruidosos.

A espessura calculada com o algoritmo de flancos possui menos ruído que o de picos absolutos, uma vez que o objetivo do algoritmo é justamente uma melhoria, através da correção do início de cada eco.

As soldas são mais visíveis nas vistas de chapas do que nos cortes.

Ainda que existam alguns canais ruidosos, é possível caracterizar alguns eventos sem dificuldade na vista da chapa e cortes.

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 – Conclusão

Este projeto apresenta conhecimentos que vão do estudo de elementos físicos da tecnologia de ultrassom a técnicas de software, com o intuito de desenvolver uma ferramenta confiável de análise.

Os ensaios foram feitos de forma que fosse possível mostrar diferentes cenários, alterando-se a resolução de pontos de detecção, o tamanho de amostras passadas, o material dos alvos de inspeção e os transdutores de ultrassom.

Ainda que as técnicas utilizadas estivessem em suas formas mais simples (digamos, sem nenhum refinamento ou filtragem posterior de dados), os resultados obtidos foram suficientes para a caracterização de chapas e um trecho de duto. Foi possível observar corrosões, furos, soldas, flanges e até curvas, mesmo utilizando-se o algoritmo mais simples.

Foi visto também a necessidade de se trabalhar em algoritmos eficientes, uma vez que em grandes quantidades de dados a carga pode aumentar algumas ordens de grandeza, inviabilizando o seu uso para análises em tempo de inspeção.

5.2 – Trabalhos Futuros

Um próximo passo para obtenção de melhores resultados de detecção é o pré-ou pós- processamento dos dados de AScan melhor condicionar o encontro de ecos e/ou a melhorar a SNR do sinal de entrada.

Uma das alternativas já utilizadas no software de análise é a Transformada de Hilbert [11] *apud* [12], que recebe um AScan e devolve sua envoltória complexa, facilitando a localização de picos relevantes, uma vez que se reduz drasticamente o número de *spikes* e, conseqüentemente, o ruído.

Uma outra forma de melhoria dos resultados é o processamento de candidatos à eco, levando em consideração a distância entre eles e a detecção já feita na vizinhança do dado analisado, para que não haja discrepância de degraus na medição.

Bibliografia

- [1] Jim Tsung, MD, MPH, *History of Ultrasound and Technological Advances*, World Congress Ultrasound in Medical Education (www.wcume.org), 2015. Acessado em 20/08/2015
- [2] J Nyby, G Whitney. *Ultrasonic communication of adult myomorph rodents*, Neuroscience & Biobehavioral Reviews, Elsevier 1978
- [3] Wolfgang Moroder, Creative Commons, sob licença CC BY-AS 3.0, 2 de Fevereiro de 2012,
http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound#mediaviewer/File:CRL_Crown_rump_length_1_2_weeks_ecografia_Dr._Wolfgang_Moroder.jpg. Acessado em 20/08/2015
- [4] Jacques and Pierre Curie, *Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées* (Desenvolvimento, via compressão, da polarização elétrica em cristais de hemiedro com faces inclinadas), *Bulletin de la Société minéralogique de France* (Boletim da Sociedade mineralógica da França), vol. 3, pp 90 - 93, 1880
- [5] Piezoelectricity. (n.d.) *McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Physics*. (2002), <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Piezoelectricity>. Acessado em 20/08/2015
- [6] *The Engineering Toolbox* - Tabela extraída, traduzida e adaptada, http://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-solids-d_713.html. Acessado em 20/08/2015
- [7] Pipedata: http://www.pipedata.net/store/books/Book04/Book04_TOC.pdf. Acessado em 20/08/2015
- [8] Pipelines International:
http://pipelinesinternational.com/news/the_origin_of_intelligent_pigs/065044/.
Acessado em 20/08/2015
- [9] Foto do Scanner CPTI: <http://www.cpti.cetuc.puc-rio.br/projeto-galeria.php?id=21>.
Acessada em 02/09/2015
- [10] Cesar Camerini; Benincaza, H.; Rodrigo Castro; Claudio S. Camerini ; Jean Pierre von der Weid ; Freitas, M. A. . Medição de Espessura com Ultrassom - Técnicas tradicionais e avançadas. Revista Abende, São Paulo, p. 32 - 44, 01 ago. 2008.

[11] Khvedelidze, B.V. (2001), "[Hilbert transform](#)", in Hazewinkel, Michiel, *Encyclopedia of Mathematics*, Springer, ISBN 978-1-55608-010-4.

[12] Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Hilbert_transform - Acessado em 11/09/2015

[13] Qt Documentation, <http://doc.qt.io/> - Acessado em 14/10/2015

Apêndice A

Algoritmo de Limiar Estático:

VARIÁVEIS:

```
// Parâmetros para Limiar Estático
limiarLiquido, limiarMetal
// Número de ecos e quantos ecos deseja-se capturar
numeroEcos, maximoEcos
// Variáveis correspondentes a índices dentro de
// uma amostra deAScan
// Zonas mortas: minLiquido e minMetal.
// Janelas de captura: maxLiquido e maxMetal
minMetal, maxMetal, minLiquido, maxLiquido
// Vetor de amplitudes de sinal
AScan
// Lista de índices correspondentes a posições onde são
// encontrados ecos
Ecos
// Flag para registro de 1 eco ou ecos posteriores
flagLiquido
// Índice, amplitude e janela de captura para iteração
// dentro do vetor AScan
indice, amplitude, janela
```

ALGORITMO limiarEstatico(AScan)

INÍCIO

```
// Índice começa pulando a primeira zona morta
indice = minLiquido
// Primeiro Eco possui limiar de líquido
flagLiquido = VERDADEIRO
limiar = limiarLiquido
// primeira janela de liquido
janela = maxLiquido
// Ecos é uma lista vazia, inicialmente
Ecos = { }
numeroEcos = 0

// Loop de captura
ENQUANTO (indice < tamanho(AScan) ) E (numeroEcos < maximoEcos )
  FAÇA:
    // Se índice ultrapassou a janela de líquido sem haver
    // captura,
    // AScan é descartado
    SE ( indice > janela) FAÇA:
      RETORNAR Ecos
    FIM SE
    // O valor testado é o módulo da amplitude
    amplitude = Valor Absoluto de(AScan[indice])
    // Valor ultrapassa limiar?
    SE amplitude > limiar FAÇA:
      // Atualiza o limiar para
      SE ( flagLiquido == VERDADEIRO ) FAÇA:
```

```
    limiar = limiarMetal
    flagLiquido = FALSO
FIM SE
    // Inserir-se índice na lista de Ecos
ADICIONA indice em Ecos
    numeroEcos = numeroEcos + 1
    // Atualizo a janela
    janela = indice + maxMetal
    // Pulo uma zona morta para evitar de capturar um
    // rebound do eco
    indice = indice + minMetal
FIM SE
    indice = indice + 1
FIM ENQUANTO
    // Retorna-se a lista de Ecos preenchida
RETORNAR Ecos
FIM
```

Apêndice B

Algoritmo de Picos Absolutos:

VARIÁVEIS:

```
// Número de ecos e quantos ecos deseja-se capturar
numeroEcos, maximoEcos
// Variáveis correspondentes a índices dentro de
// uma amostra de AScan
// Zonas mortas: minLiquido e minMetal.
// Janelas de captura: maxLiquido e maxMetal
minMetal, maxMetal, minLiquido, maxLiquido
// Vetor de amplitudes de sinal
AScan
// Lista de índices correspondentes a posições onde são
// encontrados ecos
Ecos
// Flag para registro de 1 eco ou ecos posteriores
flagLiquido
// Índice, amplitudes e janela de captura para iteração
// dentro do vetor AScan.
indice, amplitude, proxAmplitude, janela
// Par Índice/amplitude temporario de Candidato a Eco
// ecoCandidato[0] = indice, ecoCandidato[1] = amplitude
ecoCandidato
```

ALGORITMO picosAbsolutos(AScan)

INÍCIO

```
// Índice começa pulando a primeira zona morta
indice = minLiquido
// primeira janela de liquido
janela = maxLiquido
// Ecos é uma lista vazia, inicialmente
Ecos = {}
maximoEcos = 2
numeroEcos = 0

ecoCandidato = {0, 0}

// Loop de captura
ENQUANTO (indice < (tamanho(AScan) - 1)
  E (numeroEcos < maximoEcos ) FAÇA:
  // O valor testado é o módulo da amplitude
  amplitude = Valor Absoluto de(AScan[indice])
  proxAmplitude = Valor Absoluto de(AScan[indice + 1])
  // Busca dentro da janela
  SE (indice < janela) FAÇA:
    // Se proximo valor é maior que o atual,
    // É um max/min local
    SE (amplitude > proxAmplitude) FAÇA:
      // Comparo a amplitude com o candidato existente
      SE (amplitude > ecoCandidato[1]) FAÇA:
```

```
        ecoCandidato = { indice, amplitude }  
    FIM SE  
    FIM SE  
    // Fim da janela de busca  
    SENÃO SE (indice == janela) FAÇA:  
        ADICIONA ecoCandidato[0] em Ecos  
        janela = ecoCandidato[0] + maxMetal  
        indice = ecoCandidato[0] + minMetal  
        numeroEcos = numeroEcos + 1  
    FIM SE  
    indice = indice + 1  
FIM ENQUANTO  
  
    RETORNAR Ecos  
FIM
```

Apêndice C

Algoritmo de Limiar Dinâmico:

VARIÁVEIS:

```
// Variáveis para busca de início do eco
limiarRelativo, janelaDinamica
// Número de ecos e quantos ecos deseja-se capturar
numeroEcos, maximoEcos
// Variáveis correspondentes a índices dentro de
// uma amostra de AScan
// Zonas mortas: minLiquido e minMetal.
// Janelas de captura: maxLiquido e maxMetal
minMetal, maxMetal, minLiquido, maxLiquido
// Vetor de amplitudes de sinal
AScan
// Lista de índices correspondentes a posições onde são
// encontrados ecos
Ecos
// Flag para registro de 1 eco ou ecos posteriores
flagLiquido
// Índice, amplitudes e janela de captura para iteração
// dentro do vetor AScan.
indice, indiceFlanco, amplitude, proxAmplitude, janela
// Par Índice/amplitude temporario de Candidato a Eco
// ecoCandidato[0] = indice, ecoCandidato[1] = amplitude
ecoCandidato
```

ALGORITMO picosAbsolutos(AScan)

INÍCIO

```
// Índice começa pulando a primeira zona morta
indice = minLiquido
// primeira janela de liquido
janela = maxLiquido
// Ecos é uma lista vazia, inicialmente
Ecos = { }
maximoEcos = 2
numeroEcos = 0

ecoCandidato = {0, 0}

// Loop de captura
ENQUANTO (indice < (tamanho(AScan) - 1)
  E (numeroEcos < maximoEcos ) FAÇA:
  // O valor testado é o módulo da amplitude
  amplitude = Valor Absoluto de(AScan[indice])
  proxAmplitude = Valor Absoluto de(AScan[indice + 1])
  // Busca dentro da janela
  SE (indice < janela) FAÇA:
    // Se proximo valor é maior que o atual,
    // É um max/min local
    SE (amplitude > proxAmplitude) FAÇA:
```

```

// Comparo a amplitude com o candidato existente
SE (amplitude > ecoCandidato[1]) FAÇA:
    ecoCandidato = {indice, amplitude}
FIM SE
FIM SE
// Fim da janela de busca
SENÃO SE (indice == janela) FAÇA:
    // Dentro da janela, inicio a busca pela janela dinamica
    indiceFlanco = ecoCandidato[0] - janelaDinamica
    ENQUANTO (indiceFlanco < ecoCandidato[0]) FAÇA:
        amplitude = AScan[indiceFlanco]
        SE (amplitude <
            (ecoCandidato[1] * limiarRelativo) ) FAÇA:
            ecoCandidato = {indiceFlanco, amplitude}
        FIM SE
        indiceFlanco = indiceFlanco + 1
    FIM ENQUANTO

    ADICIONA ecoCandidato[0] em Ecos
    janela = ecoCandidato[0] + maxMetal
    indice = ecoCandidato[0] + minMetal
    numeroEcos = numeroEcos + 1
    FIM SE
    indice = indice + 1
FIM ENQUANTO

RETORNAR Ecos
FIM

```