

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

SISTEMA EMBARCADO DE PROCESSAMENTO DIGITAL PARA INSPEÇÃO
ULTRASÔNICA DE DUTOS

AUTORES:

André Luiz Zimmermann, andre.zimmermann@poli.usp.br
Ramon Vieira Canales, ramon.canales@poli.usp.br
Douglas Daniel Sampaio Santana, douglas.santana@poli.usp.br
Celso Massatoshi Furukawa, cmfuruka@usp.br

INSTITUIÇÃO:

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PMR, São Paulo, SP

SISTEMA EMBARCADO DE PROCESSAMENTO DIGITAL PARA INSPEÇÃO ULTRASÔNICA DE DUTOS

Abstract

This paper describes the development of an ultrasonic system for anti-corrosion inspection of metal pipelines. A maximum likelihood (ML) technique is used to improve the estimation of the TOA (Time of Arrival) of multiple echoes, in order to evaluate the thickness of the wall directly from the difference between the first two echoes. This work describes the development of a complete system, including the entire hardware structure which will be loaded on PIGS, and the ML algorithm applied in signal processing. The TOA estimation algorithm is based on a mathematical model known as Matched Filter or North Filter, combined with BPKS phase modulation of the signal. The algorithm is fully implemented in dedicated hardware for real time processing using high density FPGA (Field Programmable gate array).

Keywords: PIG (Pipeline Inspection Gauge) Inspection by ultrasound, Embedded Systems, DSP (Digital Signal Processing).

Introdução

A corrosão é a principal causa de deterioração dos oleodutos. Muitos esforços têm sido despendidos no intuito de prolongar a vida útil destas instalações, e ao mesmo tempo evitar gastos excessivos com paradas de manutenção. Neste sentido, oleodutos e gasodutos devem ser inspecionados periodicamente para que se acompanhe a taxa de corrosão nestas instalações, permitindo assim a previsão de paradas de manutenção.

O PIG (*Pipeline Inspection Gauge*) é o principal equipamento utilizado na inspeção de dutos, sendo voltado para a detecção de falhas como trincas e pontos de perda de material por processos corrosivos. As configurações possíveis para o uso de PIGs em inspeções e análises é diversa, e depende diretamente da instrumentação instalada no mesmo. Os sensores mais comuns embarcados em PIGs são os sensores táteis, sensores de vazamento de fluxo magnético (*MFL-Magnetic Flux Leakage*) e sensores ultra-sônicos. Estas técnicas vêm sendo estudadas e aplicadas por mais de 40 anos, dentre as quais se destaca aquela com o uso de transdutores de ultra-som por seus bons resultados, principalmente devido a avanços recentes nesta área (Canales, et al, 2007).

Metodologia

Inspeção por Ultra-som

Neste trabalho utiliza-se o método pulso-eco, que consiste em emitir sinais acústicos conhecidos nas faixas de frequência do ultra-som, através do fluido (petróleo, gás, etc.) e efetuar as leituras dos ecos do sinal refletido nas paredes do tubo, como mostra a sequência da figura 1.

Na figura 1a, um transdutor emite pulsos de ultra-som contra a parede interna do duto. A figura 1b mostra que, ao atingir a interface entre o fluido e a superfície interna da parede, parte do sinal é refletida (feixe superior), gerando o primeiro eco, e parte do sinal é transmitida (feixe inferior) para o interior da parede metálica, onde ocorrem novos ciclos de transmissão e reflexão, gerando os ecos subsequentes. O instante de chegada de cada um dos sinais de eco ao transdutor é conhecido como *TOA*, do inglês *Time of Arrival*. Uma vez conhecidas as velocidades de propagação da onda acústica no fluido e na parede do duto, pode-se estimar os valores de espessura das paredes a partir dos dois primeiros ecos captados, tomando a diferença entre os *TOAs* 1 e 2.

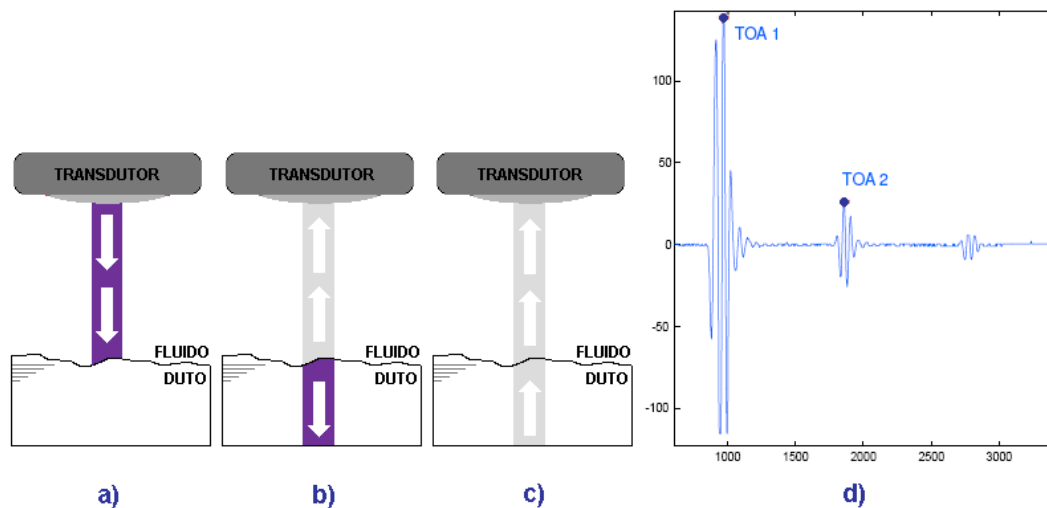


Figura 1: Inspeção por ultra-som através da técnica pulso-eco. a) Emissão do sinal de ultra-som; b) reflexão e transmissão do sinal na interface interna do duto; c) Reflexão do sinal na interface externa do duto; d) Gráfico indicando os dois primeiros ecos, provenientes das reflexões nas interfaces interna e externa do duto, respectivamente.

Geração, Recepção e Processamento de Sinais

Fenômenos como atenuação e ruído comprometem a qualidade da inspeção, diminuindo a precisão e a confiabilidade dos resultados. Estes problemas são especialmente relevantes no caso dos dutos de transporte de petróleo, onde ocorre acúmulo significativo de resíduos nas paredes, além do alto índice de atenuação do petróleo, dificultando a captação dos ecos decorrentes do sinal. Neste contexto evidenciam-se as vantagens do emprego de uma abordagem digital para se obter resultados melhores e mais confiáveis em contraposição à abordagem analógica do problema.

A técnica analógica tradicional envolve a captação dos ecos dos pulsos gerados através de transdutores de ultra-som, que transformam estas ondas em sinais elétricos, e por sua vez são comparados num **detector de limiar**, ou *Threshold Detector*, em inglês. O TOA é então computado quando o nível do sinal gerado atinge o limiar de comparação. Acontece, porém, que este método de estimação é extremamente suscetível a erros de leitura devidos à incidência de ruído e à atenuação da onda no meio de propagação. Em contraposição à abordagem analógica, atualmente a aplicação de técnicas digitais apresenta grandes vantagens do ponto de vista técnico associadas a baixo custo de implementação. Dentre estas vantagens destaca-se a possibilidade de refinamento dos resultados estimando os TOAs através de Modulação de Fase do sinal com **Códigos de Barker** associados ao uso de **Filtros Casados** para a detecção de picos. A aplicação destas técnicas viabiliza leituras precisas mesmo em condições de alto ruído e elevada atenuação (Lima,2002).

Para o problema básico de recepção do eco, pode-se considerar o seguinte modelo matemático:

$$r(t) = C \cdot s(t - \tau) + w(t), \quad (1)$$

para $0 \leq t \leq T$, onde

- $r(t)$ – Sinal recebido
- $s(t)$ – Sinal enviado
- C – Constante de escalamento devido à atenuação ($C < 1$)
- τ – Atraso do sinal devido ao tempo de vôo (TOA)
- $w(t)$ – Ruído branco gaussiano
- T – Período total de observação.

Com este modelo o problema de estimação do TOA passa a ser estimar o valor de τ com o menor erro possível a partir da leitura $r(t)$. A estimação de um parâmetro determinístico através da observação de

variáveis aleatórias pode ser feita aplicando-se o critério de Máxima Verossimilhança (*ML-Maximum Likelihood*), que se baseia na maximização de uma função densidade de probabilidade que neste caso relaciona os valores lidos de $r(t)$ aos valores prováveis de τ . Pode-se demonstrar (Van Trees, 1968) que a máxima verossimilhança ocorre para o valor de τ que maximiza a expressão

$$\Lambda(r(t), \tau) = \int_0^T r(u)s(u - \tau)du. \quad (2)$$

A expressão (2) é equivalente a uma integral de convolução entre o sinal $r(t)$ e o sinal enviado, $s(t)$, invertido no tempo, ou seja, $s(-t)$. Como esta função representaria fisicamente um sistema não-causal, é necessária a introdução de uma constante t_f , de forma que $s(-t)$ passe a ser $s(t_f - t)$, onde t_f é a duração do sinal. Desta forma o resultado da convolução passa a ser a estimativa do TOA somada a um atraso fixo conhecido. Pode-se ainda interpretar que o problema é dado por um sistema linear cuja entrada é o sinal $r(t)$, a função de transferência é $s(t_f - t)$ e a saída é uma função, cujo maior pico fornece a estimativa do TOA. A função de transferência deste sistema linear é conhecida como **Filtro Casado**:

$$h(t) = k.s(t_f - t) \quad (3)$$

A figura 2 apresenta um exemplo de sinal imerso em ruído e a função de saída da convolução com seu filtro casado, indicando o pico que fornece o TOA do sinal recebido.

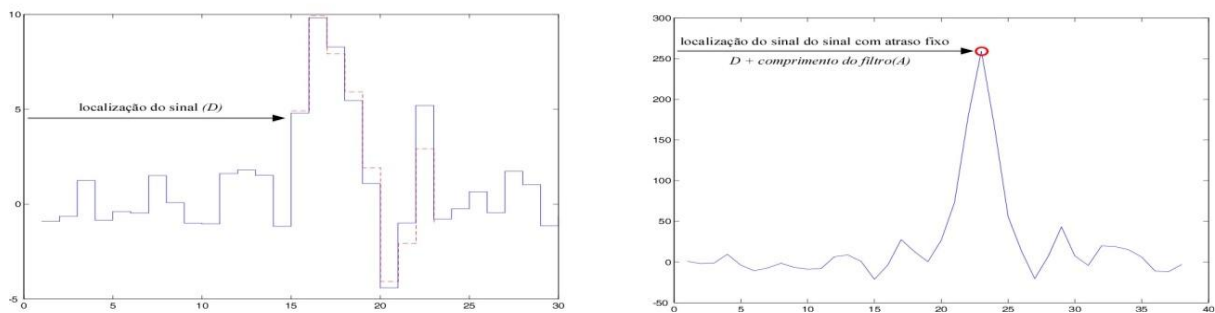


Figura 2: Sinal enviado imerso em ruído (esq.), e convolução entre o filtro casado e o sinal recebido (dir.).

É neste contexto que se encontra a importância da modulação do sinal enviado, pois com esta técnica é possível obter sinais cuja convolução com seu filtro casado apresenta picos mais pronunciados do que os picos apresentados por sinais de ultra-som típicos. Matematicamente, isso significa dizer que com o uso de modulação pode-se obter sinais cuja função de autocorrelação apresenta picos mais proeminentes, apropriados a esta aplicação.

Neste trabalho a modulação aplicada é o *Binary Phase Shift Keying (BPSK)*, e consiste em inverter a fase da onda portadora durante certos períodos de acordo com o código de modulação utilizado. A figura 3 mostra um exemplo de onda portadora cuja fase foi modulada por um código binário. Note que quando o valor do código é (+1), a fase da onda portadora é somada de zero, e quando o valor do código é (-1) a fase da onda portadora é somada de π radianos.

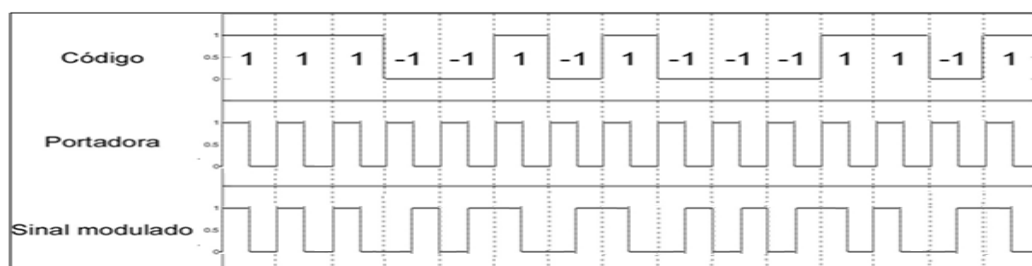


Figura 3: Aplicação de BPSK com um código binário aleatório e uma onda portadora quadrada.

Nesta aplicação serão utilizados Códigos de Barker para a modulação dos sinais. Os Códigos de Barker são seqüências binárias cuja função de autocorrelação apresenta um pico bastante acentuado (Van Trees, 1971). Como o sinal final enviado ao transdutor é uma composição da onda portadora com o código de Barker escolhido como mostra a figura 3, existem diversas composições possíveis de sinais usando este método (Código de Barker de 2 bits com 3 ciclos da onda portadora por bit, Código de 11 bits com 2 ciclos por bit, etc.).

O Sistema Eletrônico Embarcado

O projeto do sistema de inspeção foi desenvolvido para operar sobre uma plataforma totalmente baseada em *DSP* (*Digital Signal Processing*). A escolha pela implementação de circuitos dedicados decorre da necessidade de se processar em tempo real toda a informação proveniente da inspeção, já que o volume de dados é consideravelmente grande (lembrando que o aparato deve operar por longos períodos dentro da tubulação), o que inviabiliza a estratégia de armazenamento em memória e posterior processamento. Da mesma forma, o processamento em tempo real por *software* não é viável, uma vez que com os microprocessadores atualmente disponíveis não é possível e nem mesmo prático desenvolver um arranjo pequeno e eficiente o suficiente para que o conjunto eletrônico mais as baterias necessárias caibam no limitado espaço físico disponível no *PIG* e ao mesmo tempo sejam capazes de processar sinais adquiridos a taxas de 50 a 100MS/s, taxas estas necessárias para a reconstrução de sinais gerados por transdutores ultra-sônicos de 5 a 10MHz.

O sistema eletrônico completo desenvolvido para aplicação em *PIGs* ultra-sônicos segue uma arquitetura modular dividida em três blocos principais:

1. **Módulo Pulsador/Receptor (MPR):** Tem a função de gerar os pulsos elétricos de controle dos transdutores e condicionar os sinais de eco dos pulsos enviados. Tem ainda a função de amplificar o sinal recebido e transmiti-lo ao MAPD.
2. **Módulo de Aquisição e Processamento Digital (MAPD):** Utilizado para digitalizar o sinal de eco e processá-lo em tempo real para a detecção dos *TOAs*.
3. **Módulo CPU(MCPU):** Utilizado para gerenciar e configurar os MAPD e MPR. Este módulo permite ainda a comunicação externa do sistema e recuperação de dados armazenados.

O projeto dos módulos foi baseado no padrão de dimensões PC/104 para a placa (96x91 mm) e interconexões PC/104 ISA Bus de 16 bits de forma que estes módulos podem ser conectados diretamente a computadores PC/104 disponíveis no mercado. Ambos os módulos MAPD e MPR têm seu projeto centralizado no uso de *FPGAs*. No MPR o *FPGA* é responsável pela comunicação via PC104 ISA Bus, pelo armazenamento das formas de onda a serem transmitidas e pelo disparo dos sinais de acionamento dos transdutores. No MAPD o *FPGA* é responsável pela recepção dos sinais dos ecos e detecção dos *TOAs* via *DSP*, armazenamento dos dados processados em memória *EEPROM* e comunicação via Bus.

O *FPGA* pode ser facilmente reconfigurado, o que torna simples, rápido e barato implementar novos circuitos com o módulo. Para testar um novo algoritmo de processamento digital, necessita-se apenas traduzi-lo em circuitos digitais e transferi-lo para a memória de configuração do *FPGA*. Desta forma, diversas técnicas podem ser testadas sem a necessidade de fazer novas placas e circuitos. Uma das principais dificuldades no desenvolvimento deste módulo eletrônico é a geração da onda de excitação dos transdutores. Para se conseguir sinais de eco com amplitude suficientemente grande para a aquisição, é necessário que o transdutor seja excitado com tensões elevadas, próximas a 200V pico a pico. Como os transdutores usados nesta aplicação requerem uma frequência de excitação entre 5 e 10MHz, surge o problema de se conseguir chavear altas tensões a altas frequências, levando-se em consideração as limitações de espaço do projeto inerentes a um sistema embarcado. A solução para

este problema é representada na figura 4, que mostra um diagrama esquemático simplificado do circuito de controle de um transdutor, ou seja, o circuito implementado para um canal, possível graças à aplicação de componentes eletrônicos específicos para o acionamento de transdutores de ultra-som ponte de transistores CMOS de alta isolamento e alta velocidade TC6320 (SUPERTEX, EUA) e respectivo *gate driver* MD1210K6, (SUPERTEX, EUA).

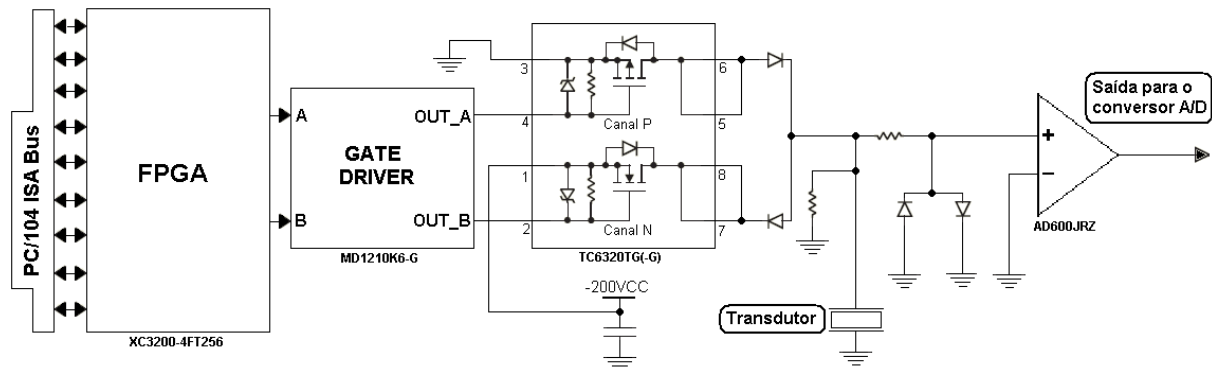


Figura 4: Circuito de controle e recepção de sinais para um transdutor (um canal).

A razão pela qual o processamento, via DSP, dos algoritmos descritos é possível decorre de uma simplificação de cálculo gerada pela discretização do sinal do eco. Após a digitalização do sinal recebido $r(t)$, a integral da equação (2) passa a ser um somatório, pois o sinal de entrada é transformado em seu equivalente no tempo discreto, de forma que a função $\Lambda(r(t), \tau)$ passa a ser:

$$\Lambda(r_j, k) = \sum_{j=k}^{k+l} r_j \cdot s_j \quad (4)$$

Onde:

- r_j – j -ésima amostra do sinal recebido
- s_j – j -ésimo elemento do sinal de referência discretizado
- l – número de elementos do sinal de referência discretizado

Neste caso, cada amostra recebida r_j será simplesmente somada ou subtraída ao valor de $\Lambda(k)$, dependendo dos elementos s_j que representam o sinal de referência discretizado que podem assumir os valores (+1) ou (-1). Portanto a expressão (4) pode ser implementada digitalmente utilizando-se apenas somadores, sem a necessidade de multiplicações. Esta característica do sinal discretizado s_j permite que todo o processamento do sinal seja realizado em *Samplig Time*, ou seja, a taxa de processamento do sinal recebido é igual à taxa de aquisição de sinais, sendo que a saída do filtro apresenta um atraso no tempo que é fixo e conhecido. A figura 6 mostra um diagrama de blocos simplificado do MAPD.

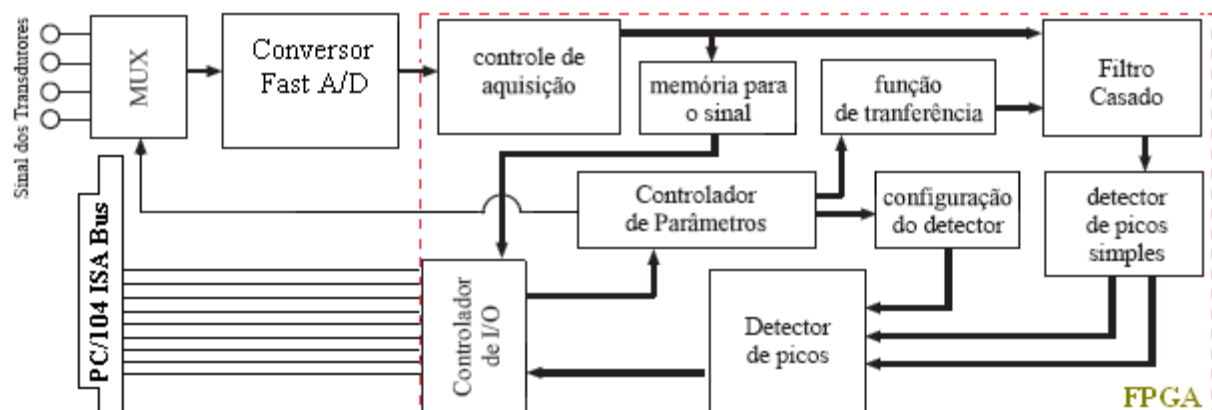


Figura 5: Diagrama de blocos simplificado do MAPD.

Resultados e Discussão

O sistema foi testado numa amostra de duto de aço corroído, executando varreduras lineares em diferentes seções (A, B, C, D, E, F, G e H), como pode ser observado na figura 6. O transdutor utilizado é do modelo Aerotech ALPHA de 5MHz, com diâmetro de 0.25" (GE, EUA). Para os testes, a amostra foi imersa num tanque de água e o transdutor, também imerso em água, foi fixado a um conjunto de movimentação acionado por motores de passo, de forma a manter o transdutor a uma distância constante da amostra ao longo da varredura.

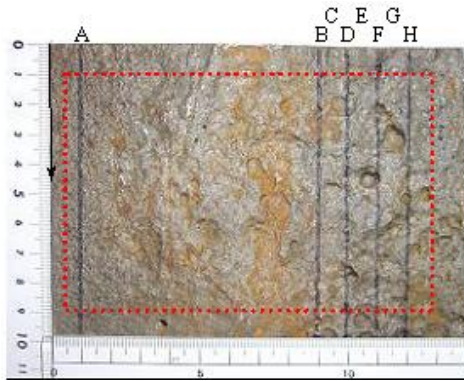


Figura 6: Amostra de duto utilizada nos testes.

Para a exposição e discussão, foram escolhidos dois pontos de inspeção. Um sobre a linha A, a 1mm da linha de referência do início de inspeção (A1), e outro sobre a linha E, a 35mm da linha de referência (E35). Estes pontos foram escolhidos propositalmente por se situarem em relevos bastante diferentes: O ponto A1 encontra-se sobre uma área pouco sujeita à corrosão, enquanto o ponto E35 encontra-se sobre uma área extremamente erodida. Para estes dois pontos são apresentados os testes com dois sinais diferentes: Primeiro um sinal modulado com um código de Barker de 2 bits e 3 ciclos de onda quadrada por bit, e segundo um sinal modulado com um código de Barker de 7 bits e 1 ciclos de onda quadrada por bit.

A figura 7 mostra os sinais enviados.

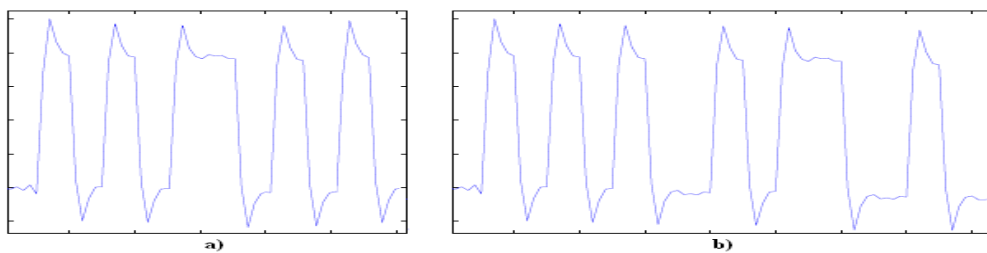


Figura 7: Sinais de input utilizados nos testes; 2bits/3 ciclos por bit em a) e 7 bits/1 ciclo por bit em b).

As figuras de 8 a 11 mostram os resultados dos testes realizados. Em todas as figuras a) apresenta o eco recebido sem a filtragem e b) apresenta o mesmo sinal de a) após a filtragem com o filtro casado, colocando em destaque os dois primeiros TOAs estimados.

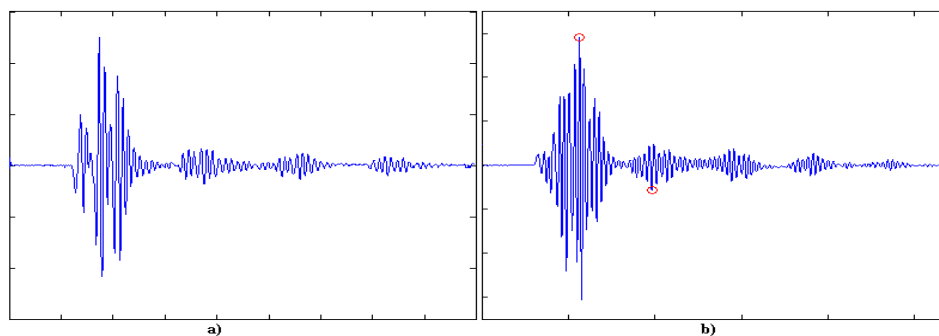


Figura 8: Teste no ponto A1, usando um sinal de 2 bits/3 ciclos por bit; a) sinal recebido e b) sinal após filtragem.

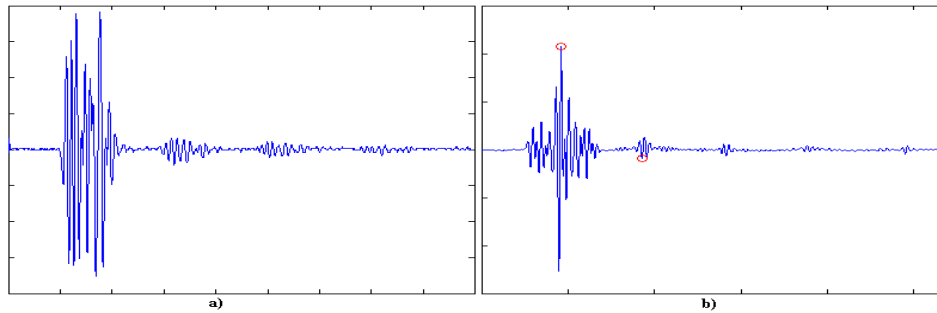


Figura 9: Teste no ponto A1, usando um sinal de 7 bits/1 ciclo por bit; a) sinal recebido e b) sinal após filtragem.

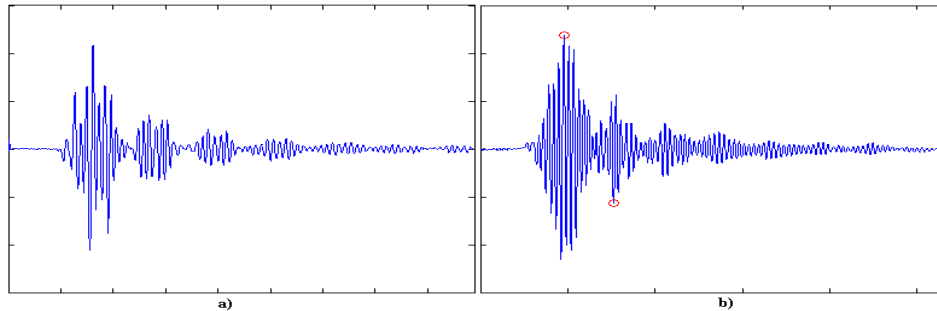


Figura 10: Teste no ponto E35, usando um sinal de 2 bits/3 ciclos por bit; a) sinal recebido e b) sinal após filtragem.

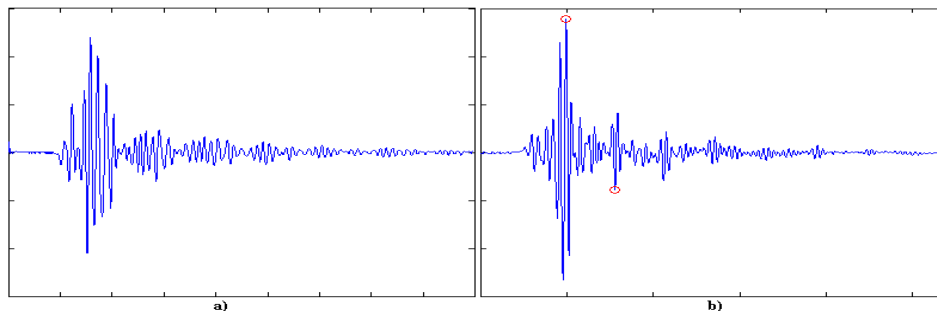


Figura 11: Teste no ponto E35, usando um sinal de 7 bits/1 ciclo por bit; a) sinal recebido e b) sinal após filtragem.

Comparando os resultados gerados pelos sinais de 2 bits e de 7 bits, nota-se uma consistente superioridade do sinal de 7 bits em relação ao de 2 bits, principalmente considerando que o comprimento do sinal completo é quase o mesmo nos dois casos: São 6 ciclos de onda quadrada para o sinal de 2 bits e 7 ciclos para o sinal de 7 bits. A vantagem do sinal de 7 bits fica evidente nos dois pontos mostrados, já que os picos observados nos gráficos dos sinais filtrados de 7 bits são consideravelmente mais pronunciados que os picos observados nos sinais filtrados de 2 bits.

Outro ponto a se destacar é a clara vantagem em se utilizar o filtro casado para o tratamento do eco, já que em todos os gráficos mostrados observa-se um melhor condicionamento no sinal filtrado do que no sinal original. Além disso, nos casos observados, em especial para os sinais de 7 bits o pico do TOA é mais pronunciado no sinal filtrado do que no eco de origem. Particularizando para o caso da figura 9, observa-se que o sinal do primeiro eco chega bastante deformado e apresentando 2 picos proeminentes, o que poderia gerar leituras errôneas na estimativa do primeiro TOA. Isto, porém, não ocorre com o sinal filtrado, no qual se observa um sinal limpo e com um único pico claro.

Conclusões

Os testes preliminares com os circuitos e algoritmos desenvolvidos mostraram-se promissores. O módulo pulsador/receptor projetado foi capaz de excitar o transdutor de forma a produzir sinais claros para a recepção. Observa-se das figuras 8 a 11 que ambos os sinais testados (2 bits/3 ciclos por bit e 7 bits/1 ciclo por bit) apresentam bons resultados tanto na superfície pouco erodida (A1) quanto na superfície muito erodida (E35), já que não se observam interferências relevantes de ruído ou de ecos

espúrios gerados pelas imperfeições da superfície e reflexões não previstas, o que demonstra que a técnica é eficaz e pode apresentar bons resultados também em superfícies irregulares. A considerável diferença nos resultados obtidos com os sinais de 2 e 7 bits para os mesmos pontos confirma a importância de se estudar e aplicar a modulação de sinais para a obtenção de melhores resultados.

A aplicação do filtro casado no processamento do sinal adquirido mostrou-se bastante eficaz, indicando uma possível elevação no nível de acurácia da estimativa efetuada, quando comparada à estimativa feita sem o uso do filtro. A robustez da inspeção com a aplicação do filtro pode ser evidenciada no caso do teste mostrado na figura 9, cujo sinal do eco apresenta dois picos distintos com amplitudes próximas, o que geraria leituras incorretas de *TOAs* em algoritmos tradicionais como os detectores de máximo e detectores de limiar, e que, porém, não geram leituras errôneas se filtradas por um filtro casado. Esta robustez é, em boa parte, fruto de um modelo matemático mais complexo e refinado em que o ponto de máximo que aparece após o filtro é o ponto de máxima verossimilhança procurado, ou seja, o ponto de maior probabilidade de se encontrar o valor real do *TOA*.

Agradecimentos

Ao PRH-19 (Programa de Recursos Humanos) da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas de estudos, à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio financeiro para o projeto.

Referências Bibliográficas

CANALES, R. V.; FURUKAWA, C. M.; MARUYAMA, N.; TAKARABE, E. W. **Digital ultrasonic system for internal corrosion assessment on oil pipelines**. In: Proceedings of COBEM 2007. [S.l.: s.n.], 2007.

LIMA, Frederico Vimes Faria de. **Desenvolvimento de um sistema acústico de posicionamento submarino**. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

JONAITIS, Thiago. **Desenvolvimento de Um Módulo Pulsador-Receptor Para PIGS Ultra-Sônicos**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

PC/104 EMBEDDED CONSORTIUM. **Specifications**. Disponível em: <<http://www.pc104.org/specifications.php>>. Acesso em: 15 de jul. 2008.

VAN TREES, H.L. **Detection, Estimation, and Modulation Theory - Part I**. New York. John Wiley, 1968.

VAN TREES, H.L. **Detection, Estimation, and Modulation Theory - Part III**. New York. John Wiley, 1971.