

Copyright 2012, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2012, em Salvador/BA no mês de maio de 2012.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

## **PROVUS - Desenvolvimento de um Provedor de Corrosão Ultrassônico**

Carlos A. P. Patusco<sup>a</sup>, Claudio S. Camerini<sup>b</sup>, Júlio C. Adamowski<sup>c</sup>, Marcelo Y. Matuda<sup>d</sup>,  
Flávio Buiochi<sup>e</sup>, Alan T. Souza<sup>f</sup>

### **Abstract**

Corrosion monitoring is one of the most efficacious processes that allow controlling the integrity of pipelines and its application is required by international standards in several situations. The ordinary technologies used in corrosion probes, like weight loss coupons, have some limitations regarding costs and QHSE issues; it leads to the development of alternative technologies. In the case of subsea pipelines, the use of the traditional coupons is limited to the "topside" section of the pipeline, usually in the beginning and the end of the pipeline. It restrains strongly the process of integrity assurance in subsea pipelines. The Research Center of Petrobras (CENPES), jointly with the department of Mechatronic Engineering of the University of Sao Paulo (USP) developed an ultrasound system of high sensibility to overcome these limitations. It is called "PROVUS" and it is able to estimate corrosion rates very accurately. This system presents many advantages compared to the traditional coupons, like: they are non intrusive, easy to handle/install, safer and more flexible. This paper details the present stage of development of the ultrasonic corrosion probe, the preliminary results of the experiments in laboratory and a view to the field tests and to the implementation of the tool as an alternative to pipelines monitoring.

**Keywords:** corrosion monitoring, corrosion probes, corrosion in subsea pipelines

### **Resumo**

A monitoração da corrosão é um dos processos através dos quais se evita e controla o desgaste dos dutos e sua aplicação é exigida por norma em diversas situações. As tecnologias tradicionais de provedores de corrosão, como a inserção de cupons, possuem algumas limitações de custos e de segurança operacional, levando a pesquisas para o desenvolvimento de métodos alternativos. No caso de dutos submarinos, o uso de provedores de corrosão via cupons se mostra impraticável, ficando limitado o seu uso nos trechos em que o duto é aéreo, isto é, normalmente no início e no final do duto. Essa restrição compromete fortemente o processo de garantia da integridade de dutos submarinos. Visando superar limitações como essa, a PETROBRAS/CENPES e o departamento de Engenharia Mecatrônica da USP desenvolveram um sistema de ultrassom de altíssima sensibilidade, denominado PROVUS, capaz de estimar a taxa de corrosão com precisão. Este sistema apresenta uma série de

<sup>a</sup> Engenheiro de Equipamentos Submarinos - PETROBRAS

<sup>b</sup> Consultor Sênior, Engenheiro de Equipamentos - PETROBRAS

<sup>c</sup> Doutor, Professor - USP

<sup>d</sup> Doutor, Professor - USP

<sup>e</sup> Doutor, Pesquisador - USP

<sup>f</sup> Doutor, Pesquisador - USP

vantagens sobre os tradicionais cupons, como os fatos de ser: não intrusivo, de fácil manuseio/instalação, mais seguro e mais versátil. Este trabalho apresenta o estágio de desenvolvimento atual do provador de corrosão ultrassônico, os resultados preliminares dos experimentos de laboratório e as perspectivas para testes de campo e implementação definitiva da ferramenta como alternativa para o monitoramento de dutos.

**Palavras-chave:** Monitoramento da Corrosão, Provadores de Corrosão, Corrosão em Dutos Rígidos Submarinos

## **Introdução**

---

A monitoração da corrosão é um dos processos pelos quais se evita e controla o desgaste dos dutos. Atualmente, muitas normas nacionais e internacionais exigem ou recomendam o uso de provadores de corrosão como itens de controle do processo corrosivo.

As tecnologias tradicionais de provadores de corrosão, especialmente a inserção de cupons, possuem algumas limitações de custos e de segurança operacional, levando a pesquisas para o desenvolvimento de métodos alternativos. No caso de dutos submarinos, o uso de cupons de perda de massa se mostra impraticável, ficando limitado o seu uso nos trechos em que o duto é aéreo, isto é, normalmente no início e no final do duto.

Dentro deste enfoque, a PETROBRAS/CENPES e a USP/MECATRÔNICA desenvolveram um sistema de ultrassom de altíssima sensibilidade capaz de estimar a taxa de corrosão com precisão. Este sistema apresenta significativas vantagens em relação às ferramentas atualmente disponibilizadas no mercado, tais como: ser não intrusivo, não exigir grande qualificação de operadores para sua instalação, fornecer informações sobre a taxa de corrosão em tempo real, possibilitando verificar a influência de parâmetros operacionais sobre a mesma, permitir troca/manutenção, possibilidade de funcionamento autônomo, independente de umbilicais, entre outras. Em relação às aplicações para o sistema proposto, podemos citar:

- monitoramento da corrosão em dutos rígidos submarinos - principal aplicação, tendo em vista que as poucas alternativas existentes no mercado são caras, normalmente intrusivas e de difícil manutenção. A tecnologia também seria aplicável a *risers* do tipo SCR e RHAS, permitindo avaliar a corrosividade do fluido transportado em tempo real;
- monitoramento da corrosão em dutos terrestres, com a parte mecânica simplificada, por não exigir marinização de componentes, mas com maiores exigências do sistema de ultrassom, por requerer a detectabilidade de taxas de corrosão mais baixas que de dutos submarinos.
- detecção de alagamento do anular em *risers* flexíveis. Por se tratar de um congresso de corrosão, essa aplicação não fará parte do escopo deste artigo.

## **Metodologia**

---

Em dutos rígidos submarinos, taxas de corrosão acima de 0,01 mm/mês são consideradas severas e da ordem de 2 µm/mês a 10 µm/mês são consideradas moderadas. Provadores de corrosão devem ser aptos a detectar essas taxas de perda de espessura em relativamente curtos intervalos de tempo para serem eficazes.

O equipamento PROVUS é um novo conceito em provadores de corrosão que utiliza o método de ultrassom com altíssima precisão na medição da espessura de parede, permitindo quantificar a taxa de corrosão. O sistema é composto basicamente de uma eletrônica multicanal de ultrassom, um microprocessador com memória, baterias e 32 transdutores de ultrassom. Estes 32 transdutores monitoram uma área aproximada de 150 mm x 150 mm da superfície do duto. A Figura 1 apresenta um croqui conceitual do aparelho.

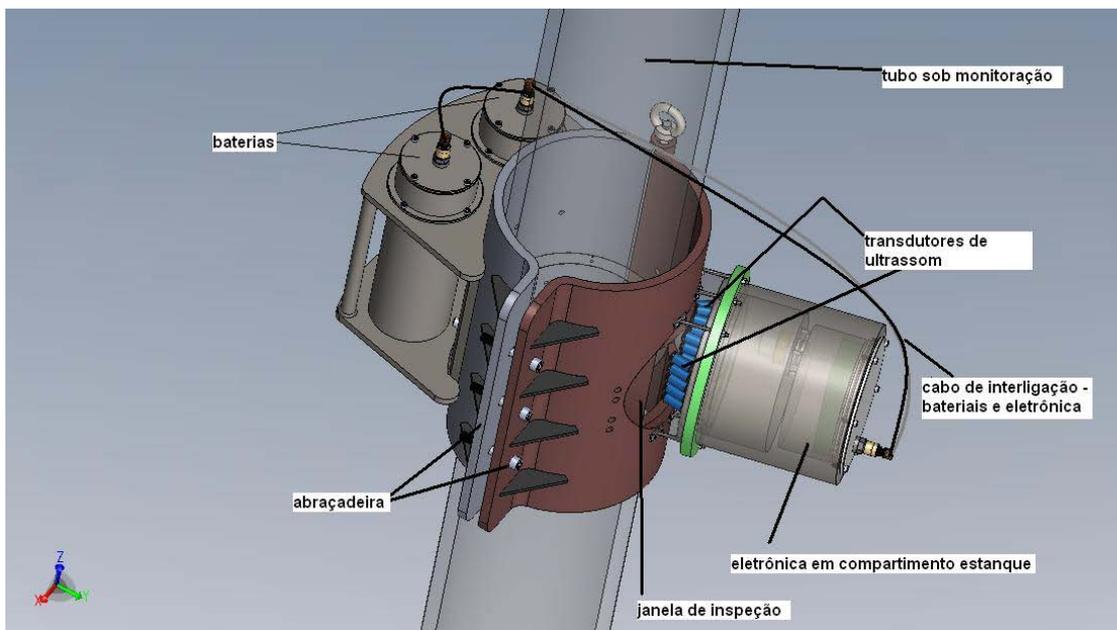


Figura 1 - PROVUS - 32 transdutores ultrassônicos medem com precisão a parede do duto/equipamento sob monitoração

A alta precisão do sistema de ultrassom do PROVUS deve-se, principalmente, a uma combinação de três fatores: a alta taxa de amostragem do sinal analógico, a compensação da variação da temperatura nos meios em que o som se propaga e o processamento de sinais sofisticado que ele utiliza.

A compensação de temperaturas é importante, pois a velocidade de propagação do som em um determinado meio muda em função da temperatura. Essa mudança leva a incertezas na medida da espessura que são inaceitáveis para que se consiga detectar taxas de corrosão típicas.

A alta taxa de amostragem do sinal é necessária para que o sistema tenha uma boa resolução. Pelo teorema de Nyquist, a frequência de amostragem de um sinal deve ser no mínimo o dobro da maior frequência contida no sinal amostrado. No caso do PROVUS, os transdutores utilizados possuem frequência central de 5 MHz e o sinal de ultrassom é amostrado com uma frequência de 50 MHz.

O Processamento de sinais inclui as seguintes etapas: enjanelamento do sinal, auto-correlação e Transformada de Hilbert interpolada. O enjanelamento do sinal, representado esquematicamente pelas figuras 2 e 3, consiste em tomar dois ecos consecutivos, geralmente o segundo e o terceiro, e colocar cada um desses ecos em uma janela diferente, de forma a

encontrar de maneira precisa o intervalo de tempo entre os dois, processo conhecido como *Time Delay Estimating*. Esses ecos têm a sua amplitude normalizada, de forma a facilitar o processamento posterior do sinal.

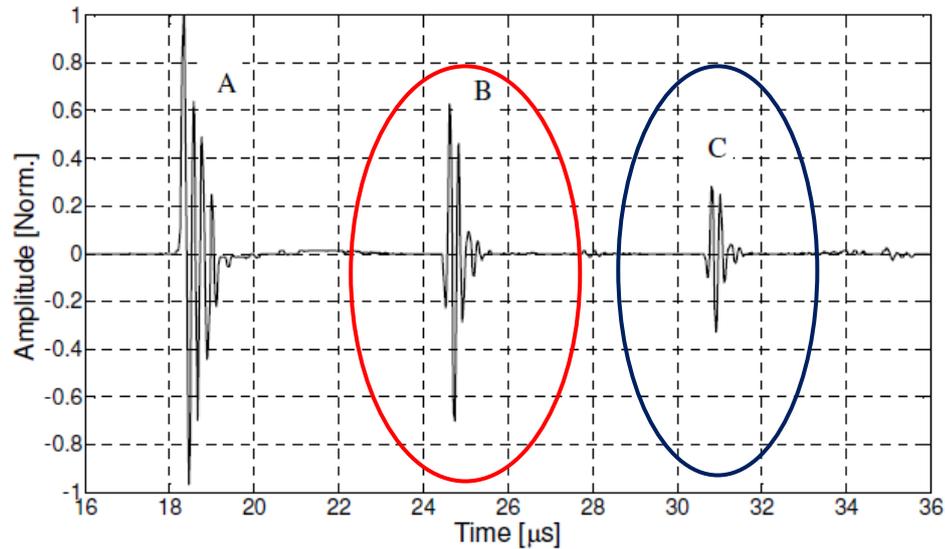


Figura 2 - Seleção dos ecos do sinal que serão processados

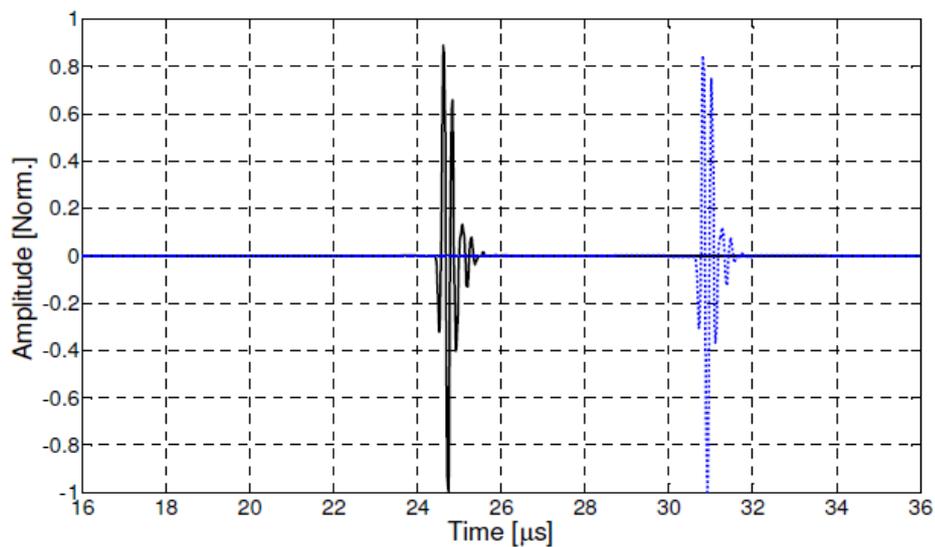


Figura 3 - Ecos enjanelados

Posteriormente, é realizada a autocorrelação do sinal, que consiste em manter um dos ecos que compõem o sinal "parado" no tempo e dar pequenos incrementos de tempo no outro, multiplicando um eco pelo outro para cada incremento de tempo. O intervalo entre os dois ecos corresponde ao máximo da função de autocorrelação, curva azul na Figura 4.

Entretanto, como é mais fácil buscar a intersecção de uma curva com o eixo das coordenadas do que encontrar o seu máximo, utiliza-se a transformada de Hilbert, curva em vermelho na Figura 4, que é uma espécie de derivada utilizada em processamento de sinais. Essa Transformada de Hilbert passa por um filtro passa-baixas, que suaviza o formato da curva, equivalendo a um filtro interpolador de 50 pontos a cada intervalo entre 2 pontos da Transformada.

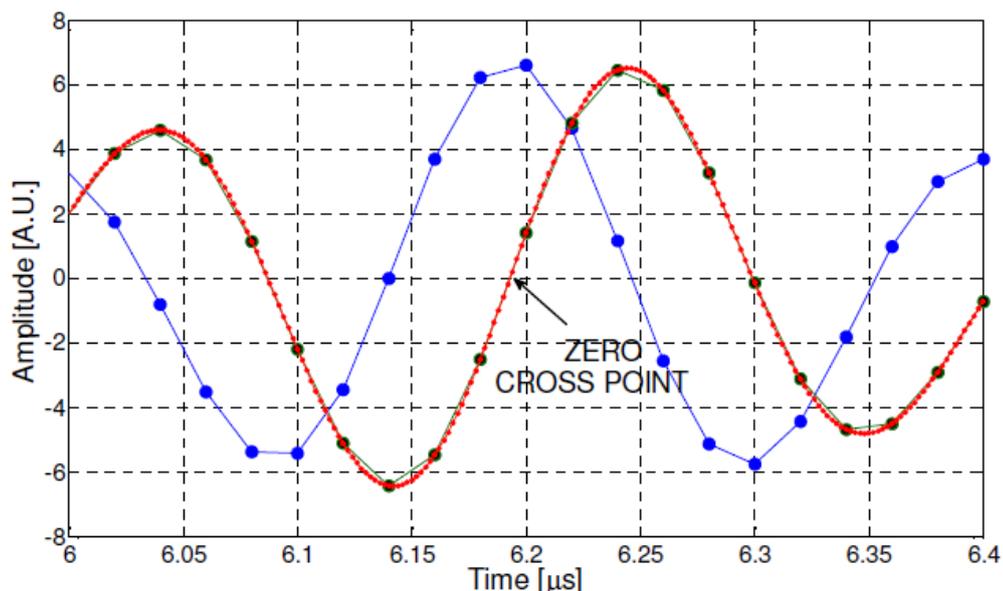


Figura 4 - Curvas de auto-correlação e Transformada de Hilbert, em azul e vermelho, respectivamente

Dessa forma, encontra-se a intersecção da Transformada de Hilbert com o eixo das coordenadas, o que equivale ao intervalo de tempo entre os dois ecos obtido com grande precisão. Como esse tempo é proporcional à espessura que está sendo medida, o controle da posição desse ponto de intersecção com o zero equivale ao controle da espessura e em última instância, ao monitoramento da taxa de corrosão do duto.

A partir desse conceito, uma série de experimentos foi conduzida na USP e posteriormente no IPT, de forma a qualificar o sistema. Em novembro de 2010, realizou-se um experimento utilizando uma seção de tubo de Alumínio de 272 mm de diâmetro x 20 mm de espessura com uma camada de água de 14 mm para acoplamento. Nesse primeiro teste, não foi gerada uma corrosão controlada, o objetivo principal era avaliar a estabilidade e a resolução do sistema na medição de diferenças de espessura em um tubo por ultrassom. Os testes rodaram por dois meses e nele foram testados o algoritmo de compensação de temperatura e o limite de detecção do sistema. Bons resultados foram obtidos, o sistema mostrou-se estável e um lixamento foi detectado (da ordem de centésimos de milímetros). Esses resultados serão discutidos em detalhes no próximo item.

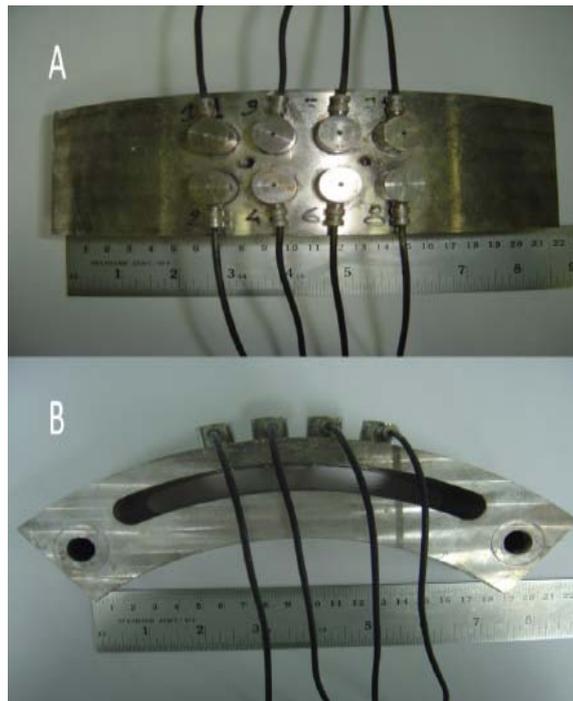


Figura 5 - Oito transdutores de 5 MHz, vista superior e lateral

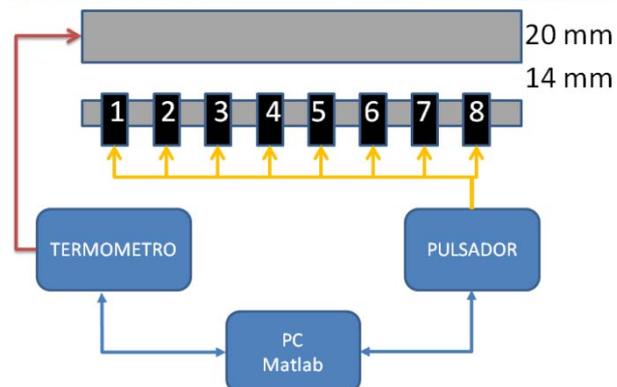


Figura 6 - Visão geral do setup experimental

Já em agosto de 2011, testes começaram a ser realizados no IPT com o objetivo de qualificar o sistema. Nesse caso, foi utilizado um tubo de aço de 7 mm de espessura e 250 mm de diâmetro. O tubo foi pintado, deixando apenas uma pequena área exposta, de forma que a parte pintada não corroesse e que a parte sem pintura se tornasse o anodo de uma pilha eletroquímica. Aplicou-se, então, uma corrente elétrica controlada sobre o tubo, de forma que a perda de espessura "teórica" devido a essa corrosão controlada era conhecida. A temperatura foi monitorada continuamente.

Em um primeiro momento, a corrosão aplicada foi severa, da ordem de 0.03 mm/mês. Posteriormente, a taxa de corrosão foi continuamente diminuída, de forma a testar a capacidade de o sistema detectar taxas de corrosão moderadas para dutos rígidos submarinos. A Figura 7 mostra o setup experimental.



Figura 7 - Setup dos experimentos conduzidos no IPT

Por fim, foi realizado um teste para verificar a possibilidade do sistema ser instalado sobre camadas de revestimento de polietileno e polipropileno de 5 mm de espessura. Para isso, foram utilizadas uma amostra de tubo de diâmetro nominal 508 mm (20") x 20.6 mm (0.812") de espessura revestido com uma tripla camada de polietileno, assim como uma amostra de 508 mm (20") x 17.5 mm (0.688") de espessura revestido com uma tripla camada de polipropileno. O resultado desse e dos outros experimentos estão detalhados na próxima seção.

## **Resultados e discussão**

No teste realizado na USP em agosto de 2011, o sistema operou entre os dias 24 de agosto e 1º de outubro, o que equivale a 900 horas de funcionamento. Durante esse tempo de aquisição, constataram-se cinco paradas devido a problemas técnicos. Os resultados obtidos mostraram a importância da compensação de temperatura no funcionamento do sistema. A Figura 8 mostra a espessura do tubo medida pelos canais 7 e 8 sem e com compensação de temperatura, assim como a leitura do termômetro.

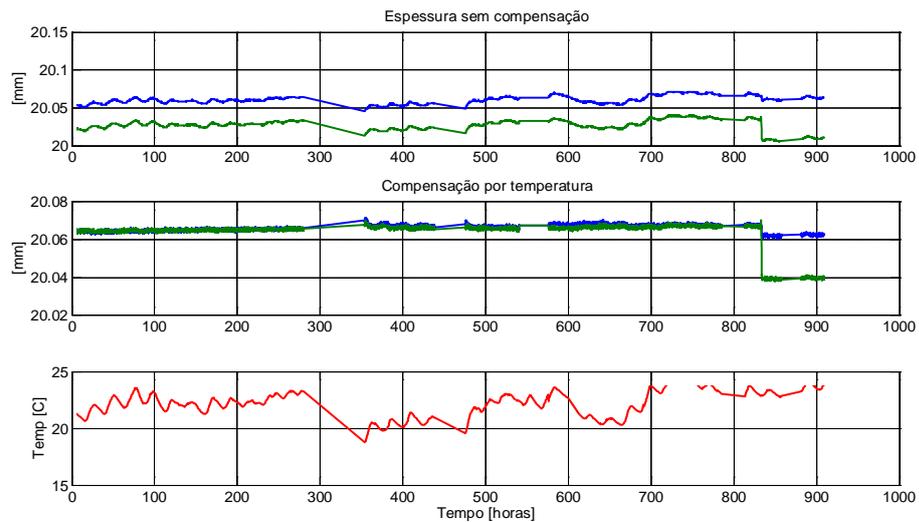


Figura 8 – Espessuras medidas sem compensação de temperatura, com compensação de temperatura e leitura do termômetro

A Figura 9 mostra que o sistema respondeu bem quando uma parte da superfície foi lixada. A variação de poucos centésimos de milímetros foi identificada pelos dois canais representados.

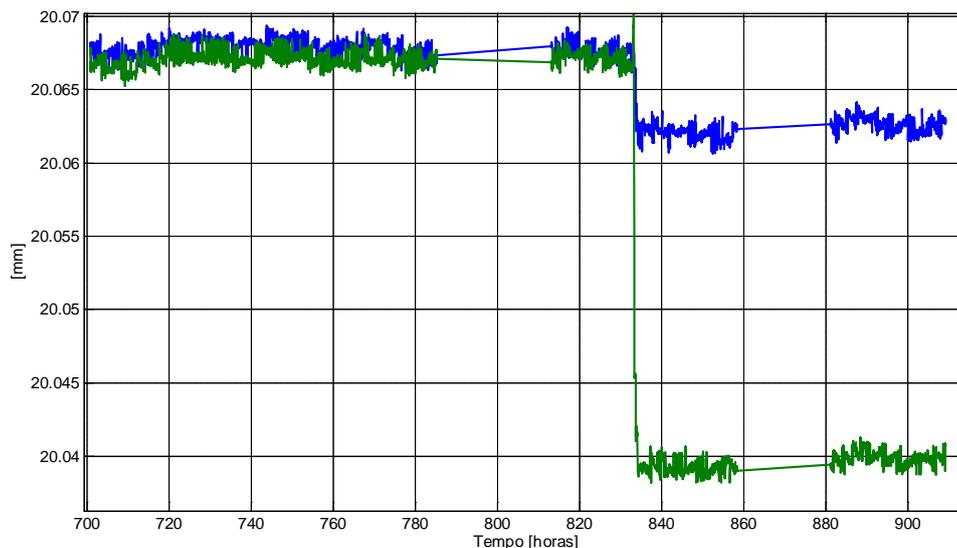


Figura 9 – Variação na espessura após a superfície da amostra ser lixada

Já nos testes realizados no IPT, buscou-se identificar com precisão a taxa de perda de espessura do tubo e compará-la com o resultado teórico do ensaio para cada corrente aplicada. Os resultados obtidos para os canais 1 e 2 estão descritos a seguir. A Figura 10 mostra os resultados obtidos com o canal 01. O primeiro gráfico mostra a leitura da espessura, o segundo mostra o tempo de vôo na água e o terceiro mostra a medida da temperatura. Nas 1100 primeiras horas, aproximadamente, de experimento, a taxa de corrosão aplicada foi de  $1 \mu\text{m}/\text{dia}$ , equivalente a uma corrente de 10 mA e em 42 dias o valor lido pelo sistema foi de  $44,4 \mu\text{m}$  contra  $42 \mu\text{m}$  que seria o valor teórico. Entre os dias 12 e 16 de novembro, o sistema ficou parado e a medida manteve-se, portanto, constante. Já a partir de 1200 horas,

aproximadamente, a taxa de corrosão mudou para  $0,5 \mu\text{m}/\text{dia}$ . Após 20 dias, o sistema de ultrassom leu uma perda de espessura de  $11,53 \mu\text{m}$  contra  $10 \mu\text{m}$  previstos teoricamente.

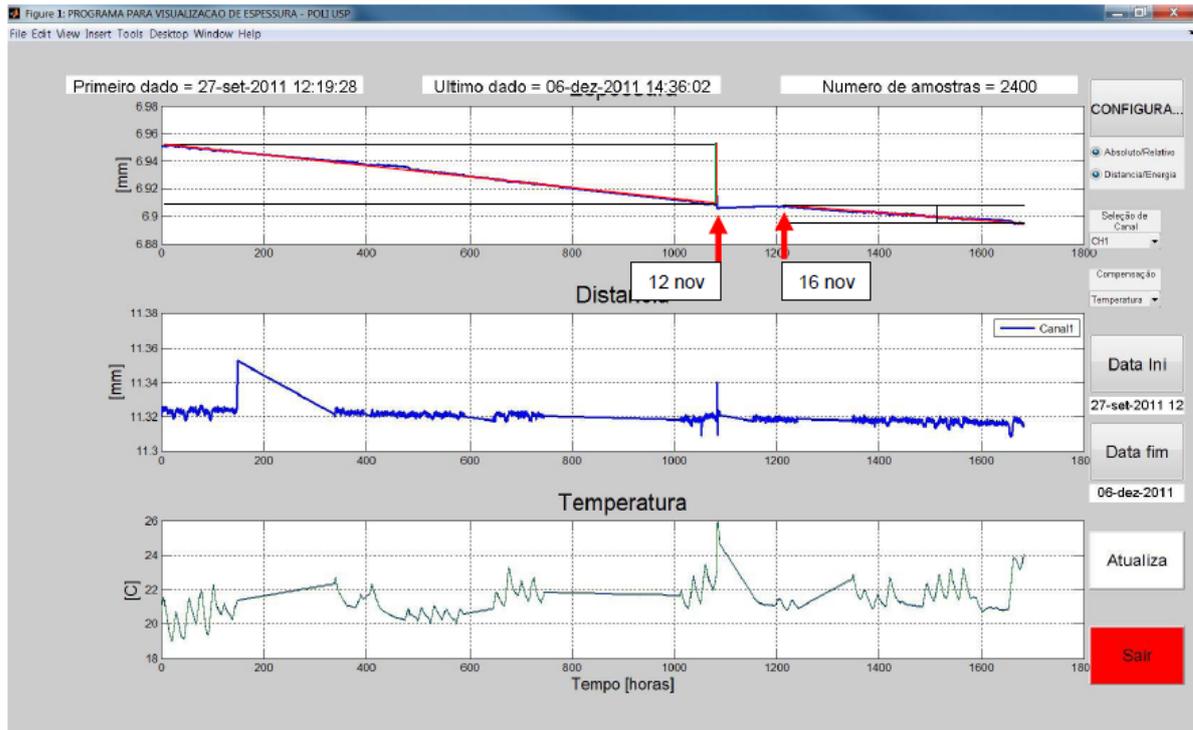


Figura 10 - Resultados obtidos para o canal 01 - Curva teórica em vermelho e dados medidos em azul. Gráficos de cima para baixo: espessura, tempo de vôo na água e temperatura

Já no canal 02, para as mesmas taxas de corrosão, o sistema obteve após os primeiros 42 dias, uma leitura de  $42,1 \mu\text{m}$  contra  $42 \mu\text{m}$  de medida teórica. O sistema também sofreu uma paralisação entre os dias 12 e 16 de novembro e depois disso, para a nova taxa de corrosão aplicada, registrou uma perda de espessura de  $11,53 \mu\text{m}$  contra  $10 \mu\text{m}$  de medida teórica. A Figura 11 mostra os resultados obtidos.

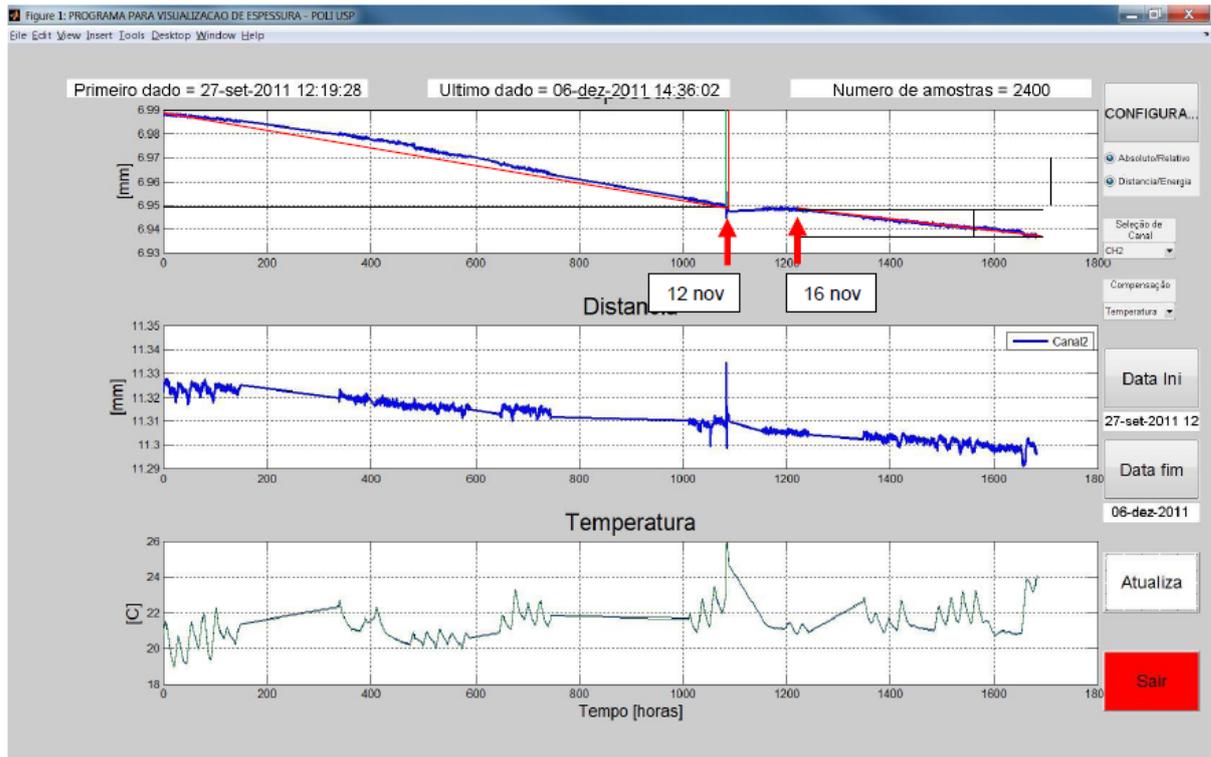


Figura 11 - Resultados obtidos para o canal 02 - Curva teórica em vermelho e dados medidos em azul. Gráficos de cima para baixo: espessura, tempo de voo na água e temperatura

Quanto aos tubos com revestimento de polietileno e de polipropileno, o provador se mostrou apto a medir a espessura de aço diretamente sobre eles, sem necessidade, portanto, de remoção dos mesmos em campo.

A Figura 12 mostra os ecos referentes à interface água/polipropileno e os ecos seguintes referentes à espessura do polipropileno. Como os ecos referentes ao polipropileno atenuam mais rapidamente que os ecos referentes ao aço, bastaria que as medidas fossem realizadas utilizando o terceiro e o quarto eco, por exemplo, onde a "interferência" do eco do polipropileno já não é relevante, pois ele já foi quase totalmente atenuado. Um resultado semelhante foi encontrado para o tubo revestido com polietileno, sendo que neste caso a atenuação do revestimento foi ainda mais rápida que no caso do polipropileno. A Figura 13 ilustra esses resultados.

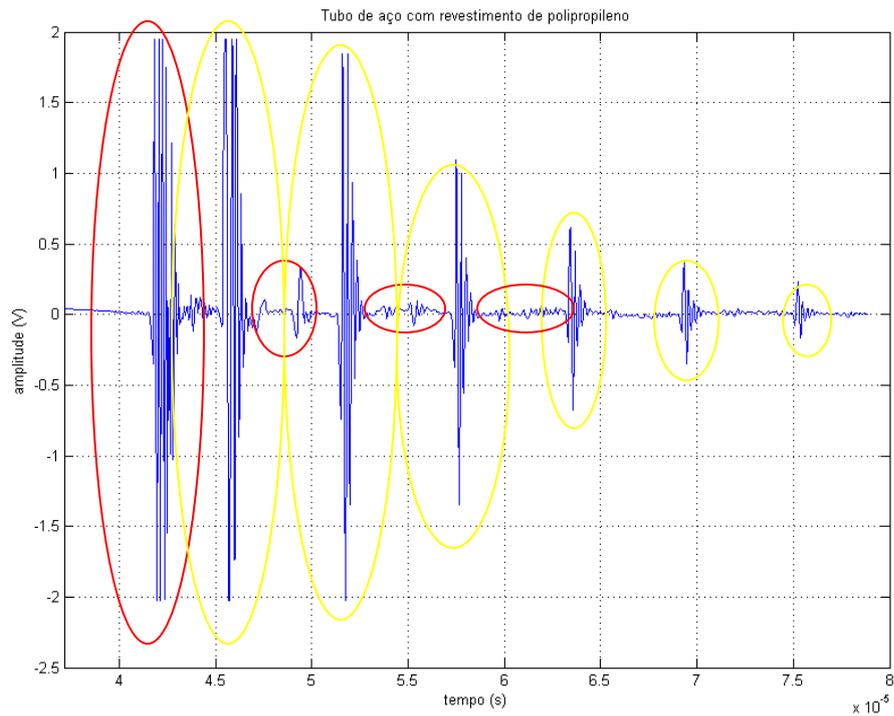


Figura 12 – Ecos referentes ao polipropileno (vermelho) e ao aço (amarelo) em amostra de tubo revestido.

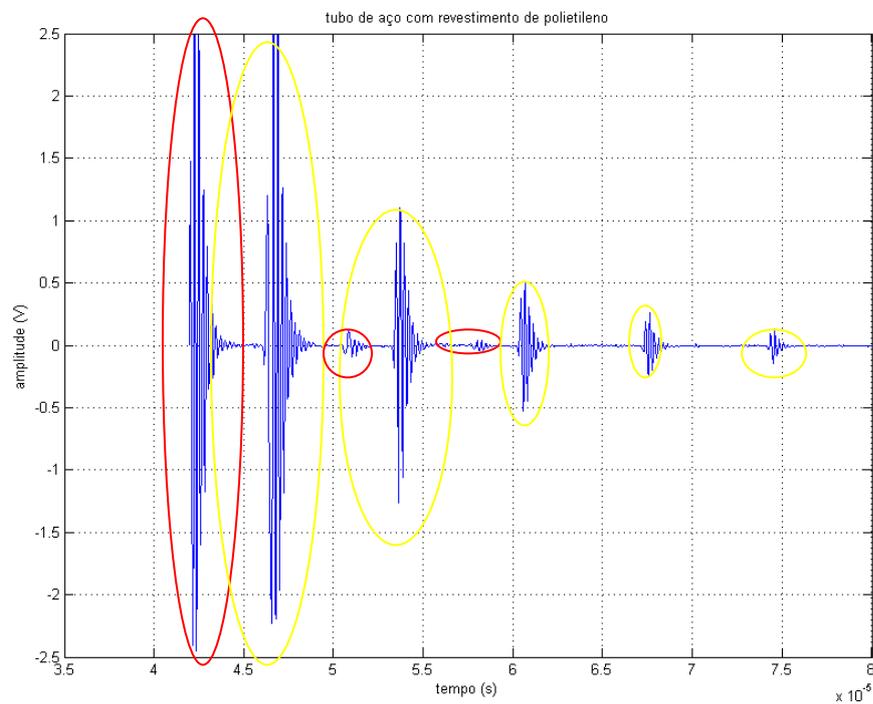


Figura 13 – Ecos referentes ao polietileno (vermelho) e ao aço (amarelo) em amostra de tubo revestido

Em paralelo, a braçadeira do provador de corrosão foi fabricada, com os vasos de pressão para bateria e eletrônica, suporte para os transdutores, etc. A montagem com os transdutores,

conectores submarinos e penetradores foi realizada. Um teste hidrostático também foi realizado para assegurar a estanqueidade das vedações por o-rings. O primeiro protótipo foi fabricado em polietileno de alta densidade, por ser leve (densidade 0,93) e por não corroer. O primeiro protótipo será instalado por mergulhadores, mas uma braçadeira comandada por ROV também está em desenvolvimento para aplicações futuras. A Figura 14 mostra o provador montado com os transdutores.

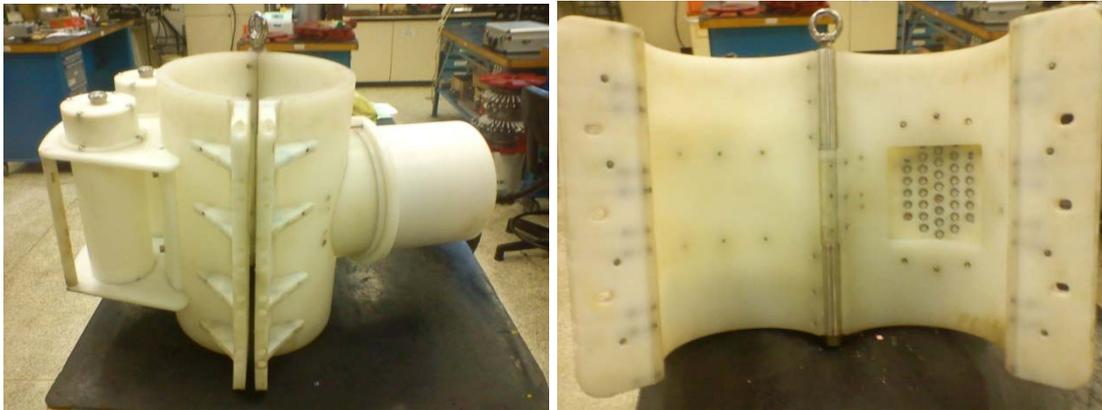


Figura 14 - Primeiro protótipo do provador de corrosão

## Conclusões

A ferramenta mostrou-se com grande potencial para se tornar uma alternativa no monitoramento de corrosão de dutos rígidos submarinos, além de se ter vislumbrado outras aplicações para a mesma, desde que sejam realizadas adaptações, para o monitoramento de dutos terrestres e na detecção de alagamento no anular de dutos flexíveis.

O sistema de ultrassom mostrou-se apto a detectar perdas de espessura com grande precisão e suficientemente estável para conseguir uma resolução da ordem de poucos micrômetros. Comprovou-se também que ele é capaz de medir sobre camadas de revestimento de polietileno e de polipropileno sem dificuldades.

O sistema traz grandes vantagens em relação aos provadores intrusivos e alternativas de mercado, mas ainda precisa ser validado em campo. Nessa etapa, novas dificuldades poderão surgir, como: a estabilidade no posicionamento dos transdutores, a deposição de sedimentos, a quantidade limitada de memória e energia.

Em uma visão de longo prazo, planeja-se adaptar o PROVUS para comunicação de dados por modem acústico, seja diretamente para a plataforma, seja para um AUV (Autonomous Underwater Vehicle). Já se encontra em desenvolvimento também uma braçadeira operada por ROV (Remotely Operated Vehicle) que permitirá a instalação do sistema em águas profundas, onde a operação com mergulhadores não é possível.

**Referências bibliográficas**

---

- (1) ADAMOWSKI, J.; PERES, N.; MATUDA, M.; BUIOCHI, F.; SOUZA, A; CAMERINI, C; PATUSCO, C. Monitoring of corrosion in pipes usong an array of ultrasound transducers.
- (2) IEEE, 1979, “Programs for Digital Signal Processing”, IEEE.
- (3) Oppenheim, A.V., and Schafer, R.W., 1998, “Discrete-Time Signal Processing”, 2nd ed., Prentice-Hall.

\* \* \*