

SISTEMA PARA IDENTIFICAÇÃO, LOCALIZAÇÃO E ESTIMAÇÃO DE CORDÕES DE SOLDAS PRESENTES EM TANQUES DE ARMAZENAMENTO DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DO PETRÓLEO

^{1,2}ELYSON A. N. CARVALHO, ¹LUCAS MOLINA, ¹EDUARDO O. FREIRE, ²BENEDITO A. LUCIANO,
²RAIMUNDO C. S. FREIRE

¹*Laboratório de Pesquisa em Inteligência Artificial, Núcleo de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal de Sergipe
Rua Marechal Rodon, S/N, Bairro Jardim Rosa Else, São Cristóvão-SE*

²*Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal de Campina Grande
Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Bodocongó, Campina Grande-PB*

*E-mails: ecarvalho@ufs.br, lmolina@ufs.br, efreire@ufs.br, benedito@dee.ufg.edu.br,
rcsfreire@dee.edu.br*

Abstract— The search for security, environmental conservation, quality control and cost reduction in the oil and gas sector stimulates the development of automatic inspection of weld lines at storage tanks. For a correct inspection it is necessary to identify and locate the weld line with accuracy. In this article, the development and evaluation of a system for the identification, location and estimation of weld lines present in storage tanks of fuel is presented. In order to do this, a linear arrangement with 15 optical-reflective distance sensors is used. It was proposed the use of interpolation *sinc* to increase the accuracy of the system and, therefore, its reliability. The data from interpolation are submitted to an estimation system, here proposed, implemented using an information and α - β filters, which are optimal estimators in the sense that they are able to minimize the variance of the measure, increasing the system reliability.

Keywords— Weld lines; distance sensor; *sinc* interpolation; information filter; α - β filter.

Resumo— A busca por segurança, conservação do meio ambiente, qualidade do serviço e redução de custos no setor de petróleo e gás motivou o desenvolvimento da inspeção automatizada de cordões de solda em tanques de armazenamento. Para uma correta inspeção é necessário identificar e localizar com exatidão o cordão de solda. Neste artigo o desenvolvimento de um sistema de identificação, localização e estimação de cordões de solda presentes em tanques de armazenamento de combustíveis é apresentado. Para tanto, é utilizado um arranjo linear com 15 sensores de distância óptico-reflexivos. Foi proposto o uso da interpolação *sinc* para aumentar a precisão do sistema e, portanto, sua confiabilidade. Os dados oriundos da interpolação são submetidos a um sistema de estimação, aqui proposto, implementado utilizando filtros de informação e α - β , que são estimadores ótimos no sentido de que eles são capazes de minimizar a variância da medida, aumentando a confiabilidade do sistema.

Palavras-chave— Cordões de solda; sensor de distância; interpolação *sinc*; filtro de informação; filtro α - β .

1 - INTRODUÇÃO

A crescente busca por segurança no setor industrial e a necessidade de controle de qualidade têm impulsionado grandes investimentos em inspeção.

Nesse contexto, sistemas de inspeção automatizados tornaram-se uma realidade nesse setor, pois além de tornarem possível uma inspeção mais confiável, minimizando o erro humano, realizam tal processo com maior velocidade e baixo custo (Carvalho, 2007b; Deutsch, 2006; Tsuge, 1988).

Essa necessidade é ainda mais acentuada em se tratando de inspeção em tanques de armazenamento de produtos nocivos à saúde e ao meio ambiente, como no caso dos tanques de armazenamento de combustíveis derivados do petróleo.

A inspeção dos cordões de solda presentes na estrutura de tais tanques deve ser feita por dentro e por fora da estrutura. Quando a inspeção é feita em seu

interior, o risco ao qual profissional que realiza a inspeção está exposto é ainda maior, uma vez que pode haver resquícios do material que estava sendo armazenado, tornando o ambiente tóxico ou com risco de explosão, e a quantidade de oxigênio disponível pode ser muito pequena.

Em algumas plantas industriais, sobretudo no setor de petróleo e gás, os tanques de armazenamento podem ter dimensões muito grandes, o que pode obrigar o profissional responsável pela inspeção a trabalhar em altitudes elevadas, resultando em aumento de custos para a empresa.

A inspeção de cordões de solda pode ser realizada por meio da emissão de ondas de ultra-som de frequência elevada. As ondas ultra-sônicas são emitidas em diferentes ângulos através da estrutura do reservatório, e se propagam por todo ele. Quando existem trincas ou bolhas de ar dentro da solda, a onda é refletida, possibilitando assim a detecção de falhas.

Esse tipo de identificação de falhas já é usado, porém, sua confiabilidade é comprometida quando não se pode garantir o posicionamento correto do sensor com relação ao centro do cordão de solda (Platte, 2002; Deutsch, 2000). Portanto, para realizar uma inspeção confiável é necessário identificar o cordão de solda com exatidão, obtendo assim os dados necessários para o posicionamento adequado do sensor.

Na Fig. 1 é mostrado o posicionamento dos sensores usados na identificação e inspeção do cordão de solda durante o processo de inspeção automatizada.

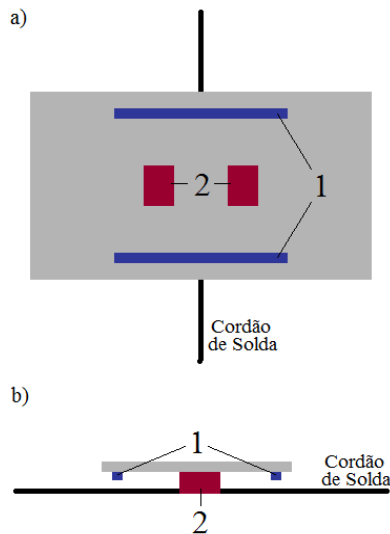


Figura 1. Posicionamento dos sensores para identificação (1) e ultra-sônicos (2) durante a inspeção. a) Vista superior b) Vista lateral esquerda.

Assim como mostrado na Fig. 2, dentre os fatores que podem comprometer uma correta identificação do cordão de solda estão o acúmulo de sujeira e a oxidação na superfície metálica.



Figura 2. Cordão de solda com acúmulo de sujeira e oxidação.

Greig (1991) apresentou um sistema de inspeção de solda para tanques submersos no oceano com a

capacidade de limpar a área onde será realizada a inspeção. Esse tipo de solução é empregada, principalmente, em sistemas de inspeção de cordões de solda submersos no oceano, onde a água em contato com a superfície a ser inspecionada serve de matéria prima para essa limpeza. Porém em sistemas não submersos essa abordagem torna-se inviável.

Dependendo dos sensores que sejam empregados, é possível que os efeitos prejudiciais do acúmulo de sujeira e oxidação possam ser minimizados sem a necessidade de uma limpeza prévia da superfície a ser inspecionada.

Portanto, a escolha dos sensores que serão utilizados, bem como o conhecimento de suas propriedades em ambiente similar aos quais serão aplicados para a identificação de cordões de solda, é de grande importância para garantir uma inspeção confiável.

Neste artigo é apresentado o desenvolvimento de um sistema a ser acoplado a um robô móvel, capaz de identificar um cordão de solda para possibilitar o posicionamento adequado dos sensores empregados na sua inspeção.

Como forma de aumentar a confiabilidade do sistema, pode-se utilizar um algoritmo para estimar a posição do cordão de solda com base nos dados obtidos pelos sensores. Nesse caso, se propõe o uso de um estimador baseado no Filtro de Informação (Mutambara, 1998), bem como de um estimador baseado no Filtro α - β (Kalata, 1997; Rawicz, 1998).

Em Carvalho (2007b) foi apresentado um sistema para identificação de cordões de solda usando sensores de distância e filtro de informação, porém o sistema apresentado possuía uma baixa resolução devido ao tamanho dos sensores. Como forma de aumentar a resolução do sistema, e conseqüentemente sua precisão e exatidão, neste artigo é apresentado o uso da interpolação sinc, que permite recuperar completamente o sinal quando em condições ideais (Oppenheim, 1989; Schanze, 1995).

O artigo está organizado da seguinte maneira: após a Introdução apresentada na Seção 1, se descreve o tipo de sensor óptico usado e os possíveis arranjos; na Seção 3 a interpolação sinc é descrita; as Seções 4 e 5 apresentam, respectivamente, o filtro de Informação e o filtro α - β ; na Seção 6 os resultados são apresentados e discutidos; finalmente, na Seção 7 são apresentadas as conclusões desse trabalho.

2 – SENSOR ÓPTICO

Como mostrado na Fig. 3, os cordões de solda presentes em tanques de armazenamento de combustível apresentam, por segurança, uma espessura maior que a das chapas que estão unindo. Essa camada de solda superior ao nível da superfície metálica é chamada de reforço, e possui cerca de cinco milímetros de altura. Dessa forma, com o uso de sensores de distância é possível identificar e localizar, com boa exatidão, os cordões de solda.

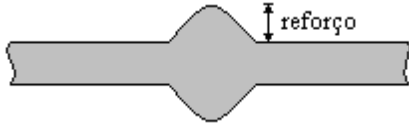


Figura 3. Perfil do material que compõe o tanque de armazenamento com solda.

Duas formas possíveis para o posicionamento dos sensores para a medição de distância foram propostas por Carvalho (2007b) e são mostradas na Fig. 4.

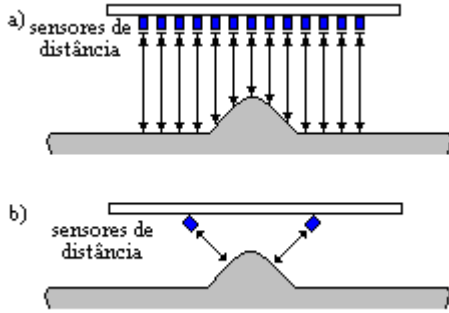


Figura 4. Posicionamento dos sensores para medição de distância. (a) Com vários sensores. (b) Com dois sensores.

A viabilidade do uso dos arranjos de sensores apresentados na Fig. 4 é discutida em (Carvalho, 2007a; Carvalho, 2007b). Neste trabalho foi feito o uso de sensores de distância como mostrado na Fig. 4a, com 15 sensores, por apresentar uma medição mais confiável (Carvalho, 2007b).

Para tanto é proposto o uso de um sensor de distância óptico-reflexivo, o TCND5000. Ele é um sensor óptico-reflexivo por luz infravermelha, com as seguintes características: dispositivo de montagem em superfície (SMD); pequenas dimensões; operação em distâncias de 2 a 40 milímetros; propriedade de filtro passa-faixa no espectro de luz; alta sensibilidade.

Tais características são desejáveis para o sistema proposto, pois na estrutura proposta para a disposição dos sensores, o cordão de solda é identificado a partir das distâncias medidas pelos sensores, bem como da posição de cada sensor. Dessa forma, o posicionamento, sensibilidade e faixa de operação de cada um deles influem significativamente para a exatidão do sistema.

3 – INTERPOLAÇÃO SINC

De acordo com o Teorema da Amostragem de Nyquist, amostras de um sinal de frequência limitada, obtidas com um período de amostragem fixo e conhecido, são suficientes para representar completamente o sinal, desde que a frequência de amostragem, Ω_s , seja maior ou igual que duas vezes a maior frequência do sinal, Ω_N . O sinal amostrado, $x_s(t)$, no tempo t , pode ser representado por:

$$x_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]\delta(t - nT) \quad (1)$$

onde, $x[n]$ representa a seqüência de valores da amostragem, n é o número da amostra na seqüência, δ a função impulso e T o período de amostragem.

Dessa forma, uma vez atendidos os critérios necessários para a validade do Teorema da Amostragem de Nyquist, o sinal pode ser completamente recuperado a partir de suas amostras e a partir do conhecimento do período de amostragem. Para tanto, tais amostragens devem ser submetidas a um filtro passa-baixas contínuo no tempo com um valor da frequência de corte do filtro, Ω_c , compreendido entre Ω_N e $\Omega_s - \Omega_N$, convenientemente escolhida como $\Omega_c = \Omega_s/2 = \pi/T$ (Oppenheim, 1989; Schanze, 1995).

No domínio do tempo esse processo é equivalente a:

$$x_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]\text{sinc}[(t - nT)/T] \quad (2)$$

onde x_r é o sinal recuperado.

4 – FILTRO DE INFORMAÇÃO

O Filtro de Informação é essencialmente um filtro de Kalman expresso em termos de medição da informação a respeito dos parâmetros de interesse (Mutambara, 1998).

Seja o modelo para o sistema

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k) = \mathbf{F}(k)\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k-1) + \mathbf{w}(k-1) & (3) \\ \mathbf{z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) & (4) \end{cases}$$

onde $\mathbf{x}(k)$ é o vetor de estados no instante t_k ; $\mathbf{F}(k)$ a matriz de transição de estados; $\mathbf{B}(k)$ e $\mathbf{u}(k)$ representam o vetor e a matriz de controle, respectivamente; $\mathbf{z}(k)$ é o vetor de observação; $\mathbf{H}(k)$ é a matriz de observação. Os vetores $\mathbf{w}(k)$ e $\mathbf{v}(k)$ representam respectivamente o ruído associado ao sistema e o erro de medição, ambos consistindo em uma seqüência branca de ruídos gaussianos com covariância conhecida.

Seja $L(k|k-1)$ o coeficiente de propagação de informação, $\mathbf{i}(k)$ a contribuição de informação de estado e $\mathbf{I}(k)$ a matriz de informação associada, as equações do Filtro de Informação são (Mutambara, 1998):

Predição:

$$\hat{\mathbf{y}}(k|k-1) = L(k|k-1)\hat{\mathbf{y}}(k-1|k-1) \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}(k|k-1) = [\mathbf{F}(k)\mathbf{Y}^{-1}(k-1|k-1)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{Q}(k)]^{-1} \quad (6)$$

Estimação:

$$\hat{\mathbf{y}}(k|k) = \hat{\mathbf{y}}(k|k-1) + \mathbf{i}(k) \quad (7)$$

$$\mathbf{Y}(k|k) = \mathbf{Y}(k|k-1) + \mathbf{I}(k) \quad (8)$$

5 – FILTRO α - β

No filtro α - β as constantes α e β são ótimas, no sentido de se obter a menor variância do dado estimado, a partir do filtro de Kalman, para medição e filtragem

de parâmetros de trajetórias em condições estacionárias, onde pode-se assumir como constantes (Kalata, 1997; Rawicz, 1998):

- O período de amostragem;
- A variância do ruído da medida;
- A aceleração.

O processo do Filtro α - β é dado por:

Predição:

$$x(k|k-1) = x(k-1|k-1) + F(k-1|k-1)u(k-1) \quad (9)$$

Correção:

$$x(k|k) = x(k-1|k-1) + \alpha[z(k) - x(k|k-1)] \quad (10)$$

$$u(k|k) = u(k-1|k-1) + \beta[z(k) - x(k|k)] \quad (11)$$

Onde u é a velocidade, z é a observação do sistema, x é a posição a ser estimada e F é o vetor de transição de estados obtido a partir do modelo do sistema.

De Kalata (1997) e Rawicz (1998), obtém-se o índice de segmento A , dado por:

$$A^2 = \frac{\beta^2}{(1-\alpha)} \quad (12)$$

A relação entre os parâmetros α e β ótimos pode ser obtida por:

$$\beta = 2(2-\alpha) - 4\sqrt{1-\alpha} \quad (13)$$

6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a caracterização do sensor óptico, apresentada em Carvalho (2007b), foi escolhida a faixa de dez a trinta milímetros, pois representa a faixa de interesse para a identificação do cordão de solda.

Como a resposta do sensor se dá através de corrente elétrica, foi montado o circuito mostrado na Fig. 5 para construção do sensor de distância óptico a partir do TCND5000.

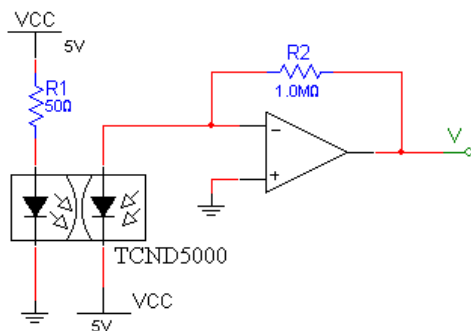


Figura 5. Sensor óptico-reflexivo construído a partir do TCND5000.

Em Carvalho (2007b) foi mostrada a resposta do sensor para diferentes cores e a equação obtida a partir da aproximação da resposta do sensor por um polinômio do terceiro grau.

Com o objetivo de mostrar a viabilidade da interpolação sinc para a tarefa proposta, foram realizados testes usando o software SciLab®. Na Fig. 6 são apresentados os resultados da interpolação sinc para

um perfil de solda ideal (Fig. 6a), considerando o mesmo como uma Gaussiana (Li, 1996), um perfil real de um cordão de solda (Fig. 6b).

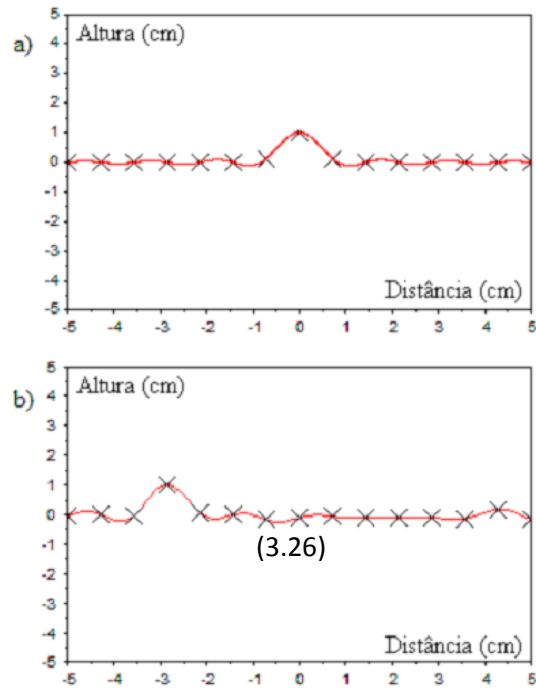


Figura 6. Desempenho da interpolação sinc (curva contínua) a partir da medição (x). a) um perfil de solda ideal com centro na referência b) um perfil de solda real de um cordão de solda.

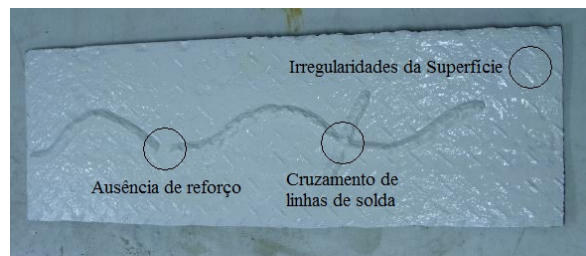


Figura 7. Superfície usada para os testes laboratoriais.

A superfície exibida na Fig. 7 foi elaborada visando realizar testes com as dificuldades normalmente encontradas no campo de operação do robô, tais como: curvatura da superfície (Fig. 8); ausência de cordão de solda em um breve trecho; cruzamento de linhas de solda; presença de mais de um cordão da solda na mesma medição; imperfeições no perfil do cordão de solda.



Figura 8. Curvatura da superfície usada nos testes.

Diferentemente da superfície mostrada na Fig. 7, os tanques de armazenamento de combustível normalmente são formados por cordões de solda aproximadamente retos, porém tal superfície foi usada para facilitar a realização dos testes e compreensão e verificação dos resultados.

A realização de experimentos com uso da superfície mostrada na figura 7 possibilitou a realização de testes com a presença de ruídos provenientes de diversas fontes, tais como irregularidades do cordão de solda e o efeito da iluminação.

Em visitas de campo e em discussões com profissionais que atuam no setor, não foram detectadas situações onde há presença de acúmulo de sujeira com altura maior que a do cordão de solda. Sendo assim, não foram realizados testes considerando essa situação. No entanto, nos casos onde ocorrer essa situação por um breve período, o sistema não deve ser significativamente afetado devido o uso do processo de estimação ótimo no sentido de se obter a menor variância possível da variável estimada.

O processo de estimação proposto está apresentado na Fig. 9. Como pode ser visto, o centro do cordão de solda calculado usando o interpolador sinc é enviado para o Filtro de Informação que estima a posição do centro do cordão de solda baseado nestes dados e numa estimação da velocidade linear com a qual o centro do cordão solda se move em relação à plataforma, obtida a partir do filtro α - β .

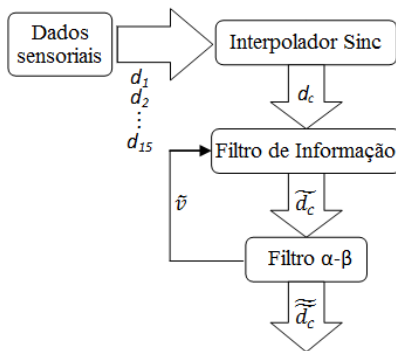


Figura 9. Diagrama de blocos do processo de estimação.

As variáveis d_1, d_2, \dots, d_{15} representam as medições de distância obtidas por cada um dos quinze sensores óptico-reflexivos. Já d_c representa o valor da distância entre o centro do cordão de solda e o centro da plataforma. O acento gráfico 'til' designa que se trata de um valor estimado.

Como a velocidade é a derivada da posição, seu cálculo é extremamente afetado por dados ruidosos. Por essa razão o filtro α - β realiza a estimação da velocidade baseado na saída do filtro de informação ao invés do uso dos dados de saída do interpolador sinc. Pode-se observar que na estrutura proposta a estimação realizada pelo filtro de informação no tempo k é feita usando a velocidade estimada pelo filtro α - β no tempo $k-1$. Isto não é um inconveniente grave uma vez que o tempo de execução do sistema é de apenas 0,1 segundo. Além disso, devido à inércia dos motores do robô móvel são prevenidas variações significativas de velocidade linear. Pode ser observado, ainda, que o Filtro α - β também estima a posição do centro do cordão de solda.

As trajetórias medidas e estimadas e a velocidade estimada são apresentadas na Fig. 10.

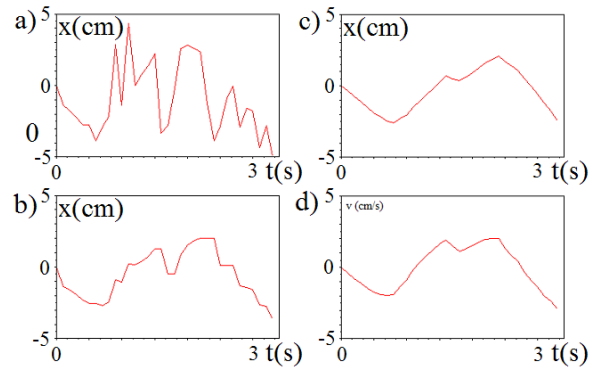


Figura 10. Gráficos obtidos em testes laboratoriais a) observação do filtro b) posição estimada pelo filtro de informação c) posição estimada pelo filtro α - β d) velocidade estimada pelo filtro α - β .

No gráfico mostrado na Fig. 10a observa-se que houve, em muitos momentos, erros de medição devido às irregularidades presentes na superfície de testes, porém, mesmo com a presença de tantos erros, foi possível recuperar satisfatoriamente a posição do centro do cordão de solda por meio do uso dos estimadores desenvolvidos. A identificação e descrição dos erros mostrados no gráfico da Fig. 10a é apresentada na Tab. 1.

Tabela 1: Erros de Medição.

Descrição do erro de medição	Tempo Inicial	Tempo Final
Ausência de reforço	0,50 s	0,75 s
Irregularidades da superfície	0,85 s	1,21 s
Cruzamento de linhas de solda	1,50 s	1,90 s
Curvatura e irregularidades da superfície	2,25 s	3,34 s

Sendo assim, observa-se que a trajetória estimada pelo filtro de informação, bem como pelo filtro α - β , são satisfatoriamente equivalentes ao cordão de solda usado para os testes e mostrado na Fig. 7, minimizando os erros apresentados na superfície de testes.

7 – CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento capaz de detectar cordões de solda presentes em tanques de armazenamento de combustíveis derivados do petróleo, para possibilitar o posicionamento adequado dos sensores de ultra-som usados na sua inspeção.

Para tanto, foi proposto o uso de um arranjo linear com quinze sensores de distância óptico-reflexivos TCND5000 para aquisição dos dados necessários à identificação do cordão de solda.

Foi projetado, construído e testado um sensor para viabilizar a tarefa de identificação dos cordões de solda, a partir do qual se pôde concluir que o uso de sensores de distância para identificação de cordões de

solda é viável e que, particularmente, o sensor TCND5000 representa uma ferramenta muito útil para esta tarefa.

O uso da interpolação sinc para recuperar o perfil de solda a partir dos dados provenientes dos sensores de distância se mostrou adequado para a identificação de cordões de solda.

Foram desenvolvidos e testados estimadores ótimos baseados nos filtros de Informação e α - β como forma de aumentar a confiabilidade do sistema, minimizando erros e melhorando, dessa forma, o seu desempenho. Tais estimadores representam uma ferramenta poderosa na identificação de cordões de solda para inspeção automatizada de tanques de armazenamento.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CENPES/PETROBRAS, CAPES, CNPq e Fundação Parque Tecnológico da Paraíba pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- CARVALHO, E. Á. N.; MOLINA, L.; Dias, A. D.; FREIRE, E. O.; LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S. Desenvolvimento de um Sistema de Baixo Custo para Identificação de Cordões de Solda para Inspeção Automatizada de Tanques Esféricos. In: VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Florianópolis-SC, Outubro 2007.
- CARVALHO, E.; MOLINA, L.; FREIRE, E.; FREIRE, R.; LUCIANO, B. Fillet Weld Identification for Automatic Inspection of Spherical Tanks. Instrumentation and Measurement Technology Conference – IMTC Proceedings IEEE, p. 1-6, May 2007.
- DEUTSCH, W. A. K. Automated Ultrasonic Inspection – Examples from the Steel Mill. Proceedings of the WCNDT World Conference for Nondestructive Testing, Italy, 2000.
- DEUTSCH, W. A. K.; SCHULTE, P.; JOSWIG, M.; KATTWINKEL R.. Automatic Inspection of Welded Pipes with Ultrasound, Proceedings of the 9th ECNDT, Berlin, 2006.
- GREIG, A.; BROOME, D. Automatic of Complex Geometry Welds, Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Robotics, IEEE, 1991.
- KALATA, P. R., MURPHY, K. M. Alpha-Beta Target Tracking and Track Rate Variations. Proc. of the 29th Southeastern Symposium on System Theory, p. 70-74, 1997.
- LI, Y.; LIAO, T. W. Weld Defect Detection Based on Gaussian Curve. SSST, p. 227, 28th Southeastern Symposium on System Theory (SSST '96), 1996.
- MUTAMBARA, A. G. O. Decentralized Estimation and Control for Multi-sensor Systems. Boca Raton: CRC, 1998.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. Discrete-Time Signal Processing. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1989.
- PLATTE, M.; DEUTSCH, V.; VOGT, M.; DEUTSCH, W. A. K.; SCHUSTER, V. Ultrasonic Testing – Compact and Understandable. Castell-publishing house, Wuppertal, 2002.
- RAWICZ, P. L.; KALATA, P. R.; CHMIELEWSKI, T. A.; MURPHY, K. M. On α - β Target Tracking Initiation. Proceedings of the 1998 American Control Conference. Vol. 4, p. 2434-2438, 1998.
- SCHANZE, T. Sinc interpolation of discrete periodic signals. IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 43, No. 6, p.1502-1503, June 1995.
- TSUGE, H. Automation of In-Service Inspection of Spherical Tanks. Weld. Int. Vol. 2, no. 7, pp. 649-652, 1988.