

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA PARA INSPEÇÃO AUTOMATIZADA DE TANQUES ESFÉRICOS

ELYSON A. N. CARVALHO[†], LUCAS MOLINA^{*}, ANDRÉ D. DIAS[†], EDUARDO O. FREIRE^{*}, RAIMUNDO C. S. FREIRE[†],
BENEDITO A. LUCIANO[†]

**Núcleo de Engenharia Elétrica - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - Universidade Federal de Sergipe
Av. Marechal Rondon, s/n, Rosa Else, Aracaju-SE, Brasil, CEP: 49.100-000, Tel: +55-79-2105-6834.*

*†Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica - Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Universidade Federal de Campina Grande
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande-PB, Brasil, CEP: 58109-970, CP 10.004,
Tel: +55-83-3310-1528.*

*E-mails: ecarvalho@ufs.br, lmolina@ufs.br, andre.eletrica@gmail.com,
efreire@ufs.br, rcsfreire@dee.ufcg.edu.br, benedito@dee.ufcg.edu.br.*

Abstract – The development of a system for fillet weld identification is considered for automatic inspection of spherical tanks. Selection and characterization of distance sensors suitable for this application are also addressed. The data provided by the sensors are processed by an estimator, developed based on an Information Filter, to increase the confidence and performance of the identification system.

Keywords – Fillet Weld Identification, Distance Sensors, Information Filter.

Resumo – O desenvolvimento de um sistema para identificação de cordões de solda é proposto para ser aplicado na inspeção automatizada de tanques esféricos. A seleção e caracterização de sensores de distância adequados a esta aplicação também são abordadas. Os dados provenientes dos sensores são processados por um estimador, desenvolvido com base em um Filtro de Informação, para aumentar a confiabilidade e o desempenho do sistema de identificação.

Palavras-chave – Identificação do Cordão de Solda, Sensor de Distância, Filtro de Informação.

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 (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.

A inspeção os cordões de solda presentes na estrutura dos tanques esféricos deve ser feita por dentro e por fora da estrutura. Quando a inspeção é feita no interior da estrutura, o risco do profissional que realiza a inspeção é ainda maior, pois, além do ambiente poder apresentar resquícios do material que estava sendo armazenado, tornando o ambiente tóxico ou com risco de explosão, este pode também apresentar pouco oxigênio, colocando em risco a vida do profissional.

Os tanques esféricos podem ter uma dimensão muito grande, fazendo com que o profissional, muitas vezes, trabalhe em altitudes elevadas, tornado o trabalho ainda mais arriscado e, conseqüentemente, aumentando os custos para a empresa.

Uma forma de realizar a inspeção de cordões de solda se faz por meio da emissão de ondas de ultrassom 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 poros 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 um posicionamento correto do sensor (Platte, 2002; Deutsch, 2000).

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.

Para que um sistema seja autônomo, sem que tenha que ser completamente programado previamente, ele deve dispor de sensores, através dos quais ele possa perceber e interagir com o ambiente que o cerca. Sendo assim, o sistema tanto poderá planejar as tarefas que precisa executar baseado na situação atual do seu ambiente de operação, como poderá efetuar correções que venham a ser necessárias em caso de erros (Dam, 1998).

O acúmulo de sujeira e oxidação na superfície metálica são fatores que podem comprometer uma correta identificação do cordão de solda.

Para tentar minimizar esse problema pode-se dotar o sistema com a capacidade de limpar a área

onde será realizada a inspeção, como em (Greig, 1991). Esse tipo de solução é empregado, 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, tal abordagem apresenta um custo muito alto, em especial no caso da aplicação em questão, onde a princípio não se tem água em contato com a superfície dos tanques que devem ser inspecionados.

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 ao que será aplicado para a identificação do cordão de solda são de grande importância para garantir uma inspeção confiável.

Nesse artigo propõe-se o uso do sensor de proximidade indutivo, E57-30GU15-G, para a identificação do cordão de solda.

Como forma de aumentar a confiabilidade do sistema pode-se inserir novos sensores com princípios físicos diferentes no sistema (Abdelrahman, 2000; Basañez, 1989; Richardson, 1988; Tang, 2000). No entanto, o uso de novos sensores deverá aumentar o custo do projeto, podendo, em alguns casos, inviabilizar o sistema. Também é possível utilizar um estimador para processar os dados obtidos pelos sensores. Nesse caso, se propõe o uso de um estimador baseado no Filtro de Informação (Mutambara, 1998).

Este artigo está organizado da seguinte maneira: na Seção 2 trata-se dos sensores que serão utilizados e o seu posicionamento; a Seção 3 é dedicada ao estimador baseado no Filtro de Informação; na Seção 4 se descreve a plataforma projetada para dar suporte ao sistema de identificação e inspeção de cordões de solda; na Seção 5 são apresentados os resultados obtidos; na Seção 6 se apresentam as conclusões e trabalhos futuros; ao final estão os agradecimentos e a lista de referências bibliográficas.

2 Sensores

Devido à constante exposição ao meio ambiente, os tanques esféricos têm uma grande tendência ao acúmulo de sujeira e oxidação em sua superfície. Isto ocorre principalmente no próprio cordão de solda, podendo gerar erros de identificação e localização a depender do tipo de sensor que seja utilizado.

Esse problema pode ser resolvido fazendo uso de sensores de distância indutivos, que realizam a medição da distância para um anteparo metálico, não importando o caso de se ter um objeto não-metálico entre o sensor e o anteparo. Sendo assim, é

possível medir corretamente a distância entre o sensor e o cordão de solda, independentemente da quantidade de sujeira e oxidação acumuladas.

Os sensores de distância indutivos têm um custo elevado e sua disponibilidade no mercado é reduzida. Como forma de suprir essa deficiência, foi desenvolvido um sensor de distância indutivo a partir de um sensor de proximidade indutivo, no qual a distância é inferida mediante a medição da corrente que passa pelo sensor.

Nesse artigo é caracterizado o sensor E57-30GU15-G por apresentar boa sensibilidade na faixa de distâncias requerida para a aplicação em questão. No entanto, para a realização prática de um sistema de inspeção automatizada de tanques esféricos será necessário o uso de um sensor com dimensões reduzidas.

Como mostrado na Fig. 1, os cordões de solda presentes em tanques esféricos 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 5 mm. Dessa forma, com o uso de sensores de distância é possível identificar e localizar, com boa precisão, os cordões de solda.

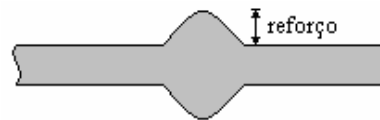


Figura 1. Perfil do material que compõe o tanque esférico com solda.

Duas formas possíveis para o posicionamento dos sensores para a medição de distância são mostradas na Fig. 2.

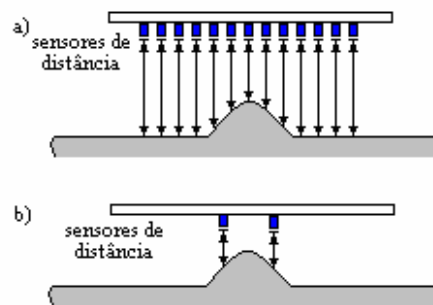


Figura 2. Posicionamento dos sensores para medição de distância. (a) Com vários sensores. (b) Com dois sensores.

Em alguns casos o perfil de solda apresenta vários pontos de máximo, o que torna o uso da estrutura proposta na Fig. 2b inadequada. Porém, na maioria dos casos é possível assumir que o perfil de solda apresenta apenas um ponto de máximo, tornando adequado o uso dessa estrutura. O possível erro na identificação do cordão de solda utilizando a estrutura com dois sensores está ilustrado na Fig. 3.

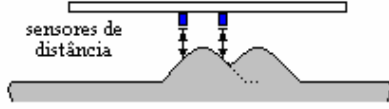


Figura 3. Possível erro na identificação do cordão de solda através da estrutura com dois sensores.

Devido ao alto custo dos sensores empregados no projeto, bem como às suas grandes dimensões físicas, a estrutura proposta na Fig. 2a torna-se cara e de difícil execução. Por conta disso, nesse trabalho, decidiu-se utilizar a estrutura com apenas dois sensores, mostrada na Fig. 2b.

Nos pontos onde houver ausência de reforço em um curto espaço, bem como nos pontos onde há cruzamento entre cordões de solda, as medidas dos sensores tornam-se inadequadas e o estimador baseado no Filtro de Informação minimiza esse problema, viabilizando a confiabilidade do sistema de identificação e localização dos cordões de solda.

3 Filtro de Informação

O Filtro de Informação é uma excelente ferramenta para a realização de tarefas de fusão de dados e estimação de estados.

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

Considere o seguinte modelo para o sistema:

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

Onde $\mathbf{x}(k)$ é o vetor de estados $n \times 1$ do processo no instante t_k ; $\mathbf{F}(k)$ o vetor de transição de estados no instante t_k e possui a mesma dimensão de \mathbf{x} ; $\mathbf{B}(k)$ e $\mathbf{u}(k)$ representam o vetor e matriz de controle no instante t_k , respectivamente; $\mathbf{z}(k)$ é o vetor de observação $m \times 1$ no instante t_k ; $\mathbf{H}(k)$ é a matriz de observação $m \times n$ que descreve a conexão ideal (sem ruído) entre as medições e o vetor de estados no instante t_k . O vetor $n \times 1$ $\mathbf{w}(k)$ consiste em uma seqüência branca de ruídos gaussianos com covariância conhecida, a qual representa o ruído associado ao sistema, e $\mathbf{v}(k)$ é um vetor $m \times 1$ representando o erro de medição, também consistindo em uma seqüência branca de ruídos gaussianos, com covariância conhecida. A correlação cruzada entre os vetores $\mathbf{v}(k)$ e $\mathbf{w}(k)$ é zero, e as matrizes de covariância associadas a eles são dadas por:

$$E[\mathbf{w}(k)\mathbf{w}^T(k)] = \begin{cases} \mathbf{Q}(k) & i = k \\ 0 & i \neq k \end{cases} \quad (3)$$

$$E[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(k)] = \begin{cases} \mathbf{R}(k) & i = k \\ 0 & i \neq k \end{cases} \quad (4)$$

$$E[\mathbf{w}(k)\mathbf{v}^T(i)] = 0, \quad \forall k, i \quad (5)$$

Seja $\mathbf{L}(k|k-1)$ o coeficiente de propagação de informação, $\mathbf{i}(k)$ a contribuição de informação de estado e $\mathbf{I}(k)$ a matriz de informação associada, dados por:

$$\mathbf{L}(k|k-1) = \mathbf{Y}(k|k-1)\mathbf{F}(k)\mathbf{Y}^{-1}(k-1|k-1) \quad (6)$$

$$\mathbf{i}(k) = \mathbf{H}^T(k)\mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{z}(k) \quad (7)$$

$$\mathbf{I}(k) = \mathbf{H}^T(k)\mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{H}(k) \quad (8)$$

As equações do Filtro de Informação são (Mutambara, 1998):

Predição:

$$\hat{\mathbf{y}}(k|k-1) = \mathbf{L}(k|k-1)\hat{\mathbf{y}}(k-1|k-1) \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}(k|k-1) = [\mathbf{F}(k)\mathbf{Y}^{-1}(k-1|k-1)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{Q}(k)]^{-1} \quad (10)$$

Estimação:

$$\hat{\mathbf{y}}(k|k) = \hat{\mathbf{y}}(k|k-1) + \mathbf{i}(k) \quad (11)$$

$$\mathbf{Y}(k|k) = \mathbf{Y}(k|k-1) + \mathbf{I}(k) \quad (12)$$

4 Plataforma

Para que as tarefas de identificação do cordão de solda e inspeção automatizada de sua integridade possam ser executadas adequadamente, se propõe o desenvolvimento de uma plataforma cujo projeto é mostrado na Fig. 4.

Como mostrado na Fig. 4, a plataforma possui dois motores, um responsável pela translação dos sensores necessários para inspeção, motor 1, e o outro responsável pela rotação dos mesmos sensores, motor 2. A translação é feita por meio de um parafuso sem fim acoplado no eixo do motor, enquanto que a rotação é realizada com o acoplamento da superfície de sensoriamento diretamente no eixo do motor 2.

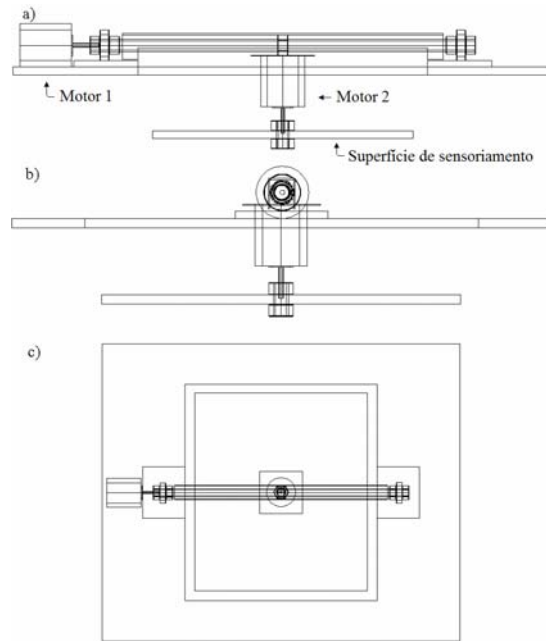


Figura 4. Plataforma para sensoriamento. (a) Visão frontal. (b) Visão lateral. (c) Visão de cima.

O projeto da plataforma é feito de modo a permitir que os sensores necessários à execução da tarefa possam ser adequadamente fixados. O projeto também prevê local para a futura instalação do *hardware* do sistema de controle responsável por posicionar corretamente os sensores que adquirem as informações utilizadas na inspeção do cordão de solda (atualmente em fase de desenvolvimento).

5 Discussão e Resultados

Devido ao alto custo e pouca disponibilidade no mercado dos sensores de distância indutivos, eles foram, a princípio, preteridos no desenvolvimento desse projeto. No entanto, percebeu-se que a corrente demandada por um determinado sensor indutivo de proximidade, (o sensor E57-30GU15-G), varia de acordo com a distância entre ele e um anteparo metálico. Sendo assim, foi montado o circuito mostrado na Fig. 5 para medir a corrente que passa pelo sensor e assim caracterizá-lo para aplicações nas quais se precise obter a distância entre o sensor e um objeto metálico.

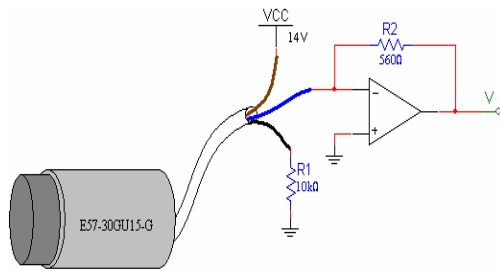


Figura 5. Circuito para medição de distância a partir da corrente que passa pelo sensor indutivo de proximidade.

No circuito montado, o valor medido de R_2 foi de $558,5\Omega$, enquanto que o valor medido de V_{CC} foi de $14,02\text{ V}$.

Para a caracterização desse sensor foi escolhida a faixa de 10 a 20 milímetros, pois, essa faixa é adequada para a aplicação em questão, e também corresponde a uma faixa na qual o sensor possui uma boa resposta. O gráfico obtido a partir da caracterização desse sensor está ilustrado na Fig. 6.

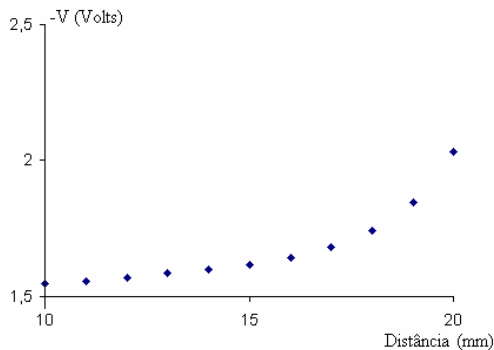


Figura 6. Relação Tensão versus Distância para o sensor indutivo E57-30GU15-G.

A partir das medições obtidas pelos sensores é necessário determinar, com boa exatidão, a distância entre o centro da plataforma e o cordão de solda. Para tanto, é necessário determinar corretamente a posição do ponto de máximo do perfil do cordão de solda.

Uma vez que o centro da plataforma seja o referencial do sistema, a cada sensor, x_1, x_2, \dots, x_n , pode ser associado um valor, que corresponde ao afastamento entre o mesmo e o centro da plataforma. Por exemplo, $x_1 = -5,5$ caso o mesmo esteja posicionado a $5,5\text{ cm}$ à esquerda do centro da plataforma. Tais sensores estão ilustrados na Fig. 7.

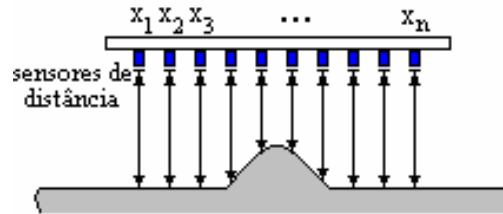


Figura 7. Representação dos sensores de distância.

Sendo assim, é possível obter a distância entre o centro da plataforma e o ponto de máximo do perfil do cordão de solda, simplesmente, verificando qual sensor está medindo a menor distância. Porém, para se obter uma boa precisão, se faz necessário a utilização de um grande número de sensores.

Porém, os sensores indutivos utilizados possuem dimensões excessivamente grandes, o que impede a utilização de uma grande quantidade deles, e motivou o uso da estrutura apresentada na Fig. 2b, onde somente dois sensores são utilizados.

Foi proposto então, um método capaz de medir, com a precisão necessária, a distância entre o ponto de máximo do perfil do cordão de solda e o centro da plataforma com base em informações de distância fornecidas por apenas dois sensores indutivos.

Devido à geometria do perfil do cordão de solda, o seu ponto de máximo tende a estar mais próximo do sensor que mediu a menor distância, o que corresponde à maior altura do perfil do cordão de solda. Porém, observando a medição do outro sensor, é possível obter uma medição mais precisa.

Ao considerar que existe uma simetria no perfil do cordão de solda e assumindo que na região de reforço, ilustrada na Fig. 8, a sua altura varia linearmente, é possível determinar a posição do ponto de máximo através do cálculo da média ponderada dos valores de afastamento (com relação ao centro da plataforma) associados aos sensores. Os pesos utilizados são a altura do perfil do cordão de solda no ponto referente a cada sensor.



Figura 8. Região de reforço do perfil do cordão de solda.

Porém, para que essa medição seja adequada, os sensores devem estar dispostos em linha, dispostos a noventa graus em relação ao cordão de solda, devendo ainda estar posicionados sempre um de cada lado do perfil do cordão de solda (com relação ao seu ponto de máximo), e na região de reforço, o que restringe muito a área de operação. Nesse sentido, os sensores devem ser dispostos de maneira a se obter a maior área de operação possível, que é obtida quando os sensores são posicionados de forma simétrica com relação ao centro da plataforma, separados entre si por uma distância igual à metade da largura da área de reforço, como mostrado na Fig. 9.

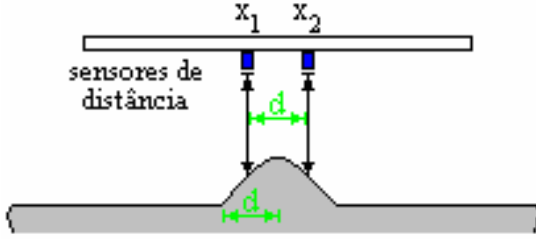


Figura 9. Posicionamento proposto para os sensores.

Como os sensores estão dispostos de maneira a medir a distância entre o perfil do cordão de solda e a plataforma, é necessário realizar a subtração entre a distância medida por cada sensor e a distância entre a plataforma e a superfície que está sendo inspecionada, obtendo assim a altura do perfil do cordão de solda.

De posse dessas alturas, e a partir das considerações feitas, é possível estimar a posição do ponto de máximo do perfil do cordão de solda em relação ao centro da plataforma usando a Eq. 13.

$$d_p = \frac{x_1 h_1 + x_2 h_2}{h_1 + h_2} \quad (13)$$

onde d_p é a distância entre o ponto de máximo do perfil do cordão de solda e o centro da plataforma; x_i representa o afastamento (com relação ao centro da plataforma) associado ao sensor i ; e h_i é a altura do perfil do cordão de solda na posição correspondente ao sensor i .

Para aumentar a confiabilidade do processo de identificação e localização de cordões de solda, foi proposta também (vide Seção 3) a utilização de um Filtro de Informação para estimar a posição do ponto de máximo do perfil do cordão de solda.

Como forma de verificar a viabilidade do sistema proposto, foram realizadas simulações usando o *software* MatLab®.

O vetor de estados $\mathbf{x}(k)$ é de dimensão unitária, pois o único estado que se deseja estimar é justamente a distância entre o ponto de máximo do perfil do cordão de solda e o centro da plataforma.

A matriz de transição de estados no tempo t_k , $\mathbf{F}(k)$, é dada por:

$$\mathbf{F}(k) = 1 \quad (14)$$

Nesse caso, o vetor de observação no tempo t_k , $\mathbf{z}(k)$, pode ser descrito por:

$$\mathbf{z}(k) = d_p \quad (15)$$

onde, d_p é dado pela Eq. 13.

Como o dado que será estimado é da mesma natureza do que está sendo observado, a matriz de observação, $\mathbf{H}(k)$, no tempo t_k é dada por:

$$\mathbf{H}(k) = 1 \quad (16)$$

A matriz de controle, $\mathbf{B}(k)$, e o vetor de controle, $\mathbf{u}(k)$, no tempo t_k , são dados por:

$$\mathbf{B}(k) = dt \quad (17)$$

$$\mathbf{u}(k) = v \quad (18)$$

onde, v é a velocidade linear do centro da plataforma em relação ao cordão de solda e dt , o degrau de tempo (período de amostragem) do sistema.

Devido ao fato de que o vetor de observações (Eq. 15) e o vetor de estados $\mathbf{x}(k)$ têm dimensão unitária, tem-se um caso particular, onde todas as equações matriciais apresentadas na Seção 3 são simplificadas e se resumem a equações escalares, o que pode ser verificado observando as equações 14 a 18.

Na Fig. 10, estão ilustrados os gráficos da trajetória real do centro da plataforma, da trajetória medida a partir das informações obtidas pelos sensores e da trajetória estimada com o Filtro de Informação, respectivamente.

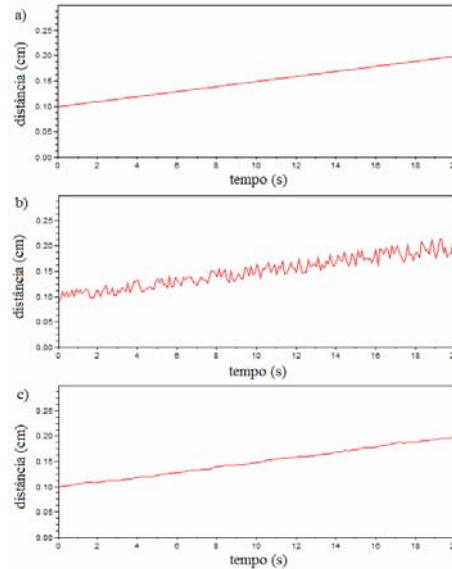


Figura 10. Trajetória do centro da plataforma: (a) trajetória real; (b) trajetória obtida a partir dos dados dos sensores; (c) trajetória estimada com o Filtro de Informação.

Para tanto, foi considerado:

$$v = 0,01 \text{ mm/s} \quad (19)$$

$$dt = 100 \text{ ms} \quad (20)$$

É possível observar nos gráficos da Fig. 10 que a trajetória do centro da plataforma calculada a partir dos dados obtidos diretamente dos sensores (Fig. 10b), usando a Eq. 13, tem uma variância maior que no caso da trajetória estimada com o Filtro de Informação (Fig. 10c).

6 Conclusão

O uso de sensores de distância para identificação e localização de cordões de solda consiste em uma ferramenta bastante útil no processo de inspeção automatizada de tanques esféricos. Particularmente, os sensores indutivos representam uma boa opção para executar esta tarefa, pois não são afetados por problemas comuns, como o acúmulo de sujeira e oxidação nas superfícies a serem inspecionadas.

A identificação de cordões de solda a partir da estrutura proposta usando apenas dois sensores indutivos de proximidade, aqui adaptados para realizarem medições de distância, representa uma alternativa de baixo custo e de fácil implementação, usando um cálculo bastante simples para a estimação do ponto de máximo do perfil do cordão de solda. No entanto, tal estrutura apresenta limitações que devem ser analisadas para cada ambiente de operação do sistema.

Para verificar a robustez do sistema é proposto, como um trabalho futuro, a aplicação deste sistema em uma situação real.

No entanto, ainda é necessário desenvolver novos métodos para identificação de cordões de solda a partir de dados provenientes de sensores de distância. Dessa forma, será possível desenvolver sistemas mais precisos e confiáveis, baseados em técnicas de fusão de dados e estimação de parâmetros, que por sua vez, deverão ser capazes de atuar em áreas de operação mais abrangentes.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio financeiro do CNPq, CAPES e PETROBRAS/ CENPES (Contrato 0050.0021069.06.2), aos quais os autores desejam agradecer.

Referências Bibliográficas

- Abdelrahman, M.; Kandasamy, P.; Frolik, J. (2000). A Methodology for the Fusion of Redundant Sensors. *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, Illinois.
- Basañez, L. (1989). Multi-sensor Integration in Robotics. In: 1o Workshop on Robotics and CIM, Lisboa, p. 1-34.
- Dam, J. (1998). Environment Modelling for Mobile Robots: Neural Learning for Sensor Fusion. PhD Thesis. Amsterdam University.
- Deutsch, W. A. K. (2000). Automated Ultrasonic Inspection – Examples from the Steel Mill. *Proceedings of the WCNDT World Conference for Nondestructive Testing*. Italy.
- Deutsch, W. A. K.; Schulte, P.; Joswig, M.; Kattwinkel R. (2006). Automatic Inspection of

Welded Pipes with Ultrasound, *Proceedings of the 9th ECNDT*, Berlin.

- Greig, Alistair and Broome, David. (1991) Automatic of Complex Geometry Welds, *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Robotics*. IEEE.
- Mutambara, A. G. O. (1998). Decentralized Estimation and Control for Multi-sensor Systems. EUA: CRC Press.
- Platte, M.; Deutsch, V.; Vogt, M.; Deutsch, W. A. K.; Schuster, V. (2002). Ultrasonic Testing – Compact and Understandable. Castell-publishing house, Wuppertal.
- Richardson, J. M.; Marsh, K. A. (1988). Fusion of Multisensor Data. In: International Journal of Robotics Research, Vol. 7, Issue 6. Special Issue on Sensor Data Fusion, pp. 78-96.
- Tang, S. (2000). Fusion of Multisensor Data, *Proceedings of the Fourth International Conference on knowledge-Based Intelligent Engineering Systems & Allied Technologies*, Brighton, UK.
- Tsuge, H. (1988). Automation of In-Service Inspection of Spherical Tanks. *Weld. Int.* Vol. 2, no. 7, pp. 649-652.