

Design of a Low-Cost Acquisition System to Reconstruct Images through Electrical Resistance Tomography

Bruno Furtado de Moura, Marcio Ferreira Martins, Francisco Sepulveda Palma, Wellington Betencurte da Silva, Jorge Acevedo Cabello, Rogerio Ramos

Abstract—Electrical Resistance Tomography (ERT) is a technique employed in the industrial environment that reconstructs images formed by the impedance distributions inside a vessel. The method relies on measures from a data acquisition system, responsible to inject a current inside the vessel and measures the voltage on the boundaries, and sequentially an inverse problem solution. This paper introduces a low-cost design of an acquisition system that can obtain 30 images/s with a signal-to-noise ratio of 57.47 dB and a maximum error of 3.79%. It utilizes a simple RMS-to-DC converter demodulation scheme to provide good accessibility to researchers aimed at investigating flow patterns of multiphase flow applications.

Index Terms—Electrical Impedance Tomography (EIT), Data Acquisition Design, Instrumentation, Multiphase Flow.

I. INTRODUÇÃO

TOMOGRAFIA POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA, do inglês *Electrical Resistance Tomography* (ERT), é uma técnica de imagem que é investigada de forma ampla nos tempos atuais. Pela injeção de uma corrente elétrica em um domínio e a consequente medição da tensão resultante, é possível reconstruir a condutividade elétrica do corpo. Tais leituras são utilizadas como medidas experimentais para a solução do problema inverso correspondente ao campo [1], [2]. O uso dessa técnica de imagem tem a vantagem de ser não-intrusivo, de custo relativamente baixo, de ser livre de radiação ionizante e de elevada resolução temporal. Entretanto, as imagens processadas são de baixa qualidade, devido à solução do problema inverso. Mesmo assim, a técnica vem sendo aplicada em diversas áreas do conhecimento, como as áreas biomédicas [3], [4] e geológicas [5], [6] bem como em aplicações industriais [7]–[9].

Contínuos esforços vêm sendo empregados para aprimoramento do desenvolvimento de sistemas de aquisição de dado

Laboratory for Computational Transport Phenomena (LFTC), Department of Postgraduate Studies in Mechanical Engineering, UFES/Brazil, bfurtado.moura@gmail.com

Laboratory for Computational Transport Phenomena (LFTC), Department of Postgraduate Studies in Mechanical Engineering, UFES/Brazil, marcio.martins@ufes.br

Laboratorio de Metrología Térmica, Mechanical Engineering Department, Usach/Chile, francisco.sepulveda.p@usach.cl

Chemical Engineering Post-graduation Program–PPEQ/CCA, UFES/Brazil, wellingtonufes@gmail.com

Laboratorio de Metrología Térmica, Mechanical Engineering Department, Usach/Chile, Jorge.acevedo.c@usach.cl

Nucleus for Oil and Gas Flow Measurement (NEMOG), Department of Postgraduate Studies in Mechanical Engineering, UFES/Brazil, rogerio.ramos@ufes.br

de ERT. Brown e Seagar [10] desenvolveram um dos equipamentos pioneiros para aplicações médicas que possui a estrutura base dos modelos atuais: o sistema de Sheffield. Dickin e Wang [11] apresentaram um modelo similar para aplicações industriais, porém com uma demodulação digital e parâmetros que podem ser ajustados, tais como magnitude da corrente e frequência. Na terceira versão do sistema de Sheffield, Wilson et al. [12] aprimoraram o sistema adicionando ao sistema injeções de multifrequência. Dessa forma pode-se caracterizar o tecido humano apropriadamente, pois este apresenta variação das propriedades elétricas com a frequência. Wilkinson et al. [13] desenvolveram um sistema para aplicações industriais que injeta correntes na forma de pulso e possui uma aquisição de dados totalmente paralela, possibilitando altas taxas de aquisição. Wang et al. [14] propuseram um sistema com dois planos de aquisição de alta velocidade que permite a medição de vazão. Por sua vez, Jia et al. [15] implementaram, no sistema de aquisição, uma fonte de tensão com um medidor de corrente. Essa construção possibilita correntes de alta intensidade para aplicações em meios altamente condutivos.

O desenvolvimento de sistemas ERT de baixo custo é desejável para prover fácil acesso à tecnologia pela indústria e pela academia. Nesses sistemas, um dos componentes de maior interesse é o microcontrolador, que pode ser considerado um dos componentes mais importante do equipamento. Uma escolha natural de baixo custo é a plataforma *Arduino*[®] de prototipação microcontrolada [16]. Este possui a vantagem da utilização de interfaces simples entre o software e o hardware. Por essa razão, o *Arduino* vem sendo utilizado para facilitar a utilização de microcontroladores em projetos de diferentes áreas [17]–[19]. Alguns sistemas de aquisição ERT de baixo custo, como o Tomo [20], utilizam o *Arduino* em seu sistema.

Considerando as premissas supracitadas, o objetivo deste artigo é desenvolver um sistema ERT, baseado no *Arduino*, capaz de realizar experimentos de identificação de padrão de escoamento multifásico com uma razão sinal-ruído (S/N) adequada para permitir a reconstrução de imagens com resolução satisfatória.

II. ARQUITETURA DO HARDWARE

O sistema de aquisição desenvolvido conta com os seguintes módulos: gerador de sinal senoidal, fonte de corrente de *Howland* controlada pela tensão, multiplexadores, sensores, amplificador de instrumentação (in-amp), demodulador RMS,

filtro passa-baixa, microcontrolador do *Arduino Due* com conversor A/D e porta serial virtual (via USB), Fig. 1. A aquisição pode ser efetuada através de 8 ou 16 eletrodos. A frequência opera na faixa entre 20-50kHz. O padrão de injeção escolhido para aquisição é o padrão adjacente. Esse padrão consiste na injeção de correntes através de eletrodos adjacentes, e a conseqüente medição de tensão diferencial através dos eletrodos adjacentes subsequentes. Deve ser enfatizado que o eletrodo que injeta corrente no ciclo não participa do processo de medição. Mais detalhes são descritos em [11]. O ciclo se repete até que todos os eletrodos passem pelo processo de injeção de corrente. O método apresenta $L(L - 3)$ medições, sendo L o número de eletrodos, na qual metade dessas medidas são independentes [11].

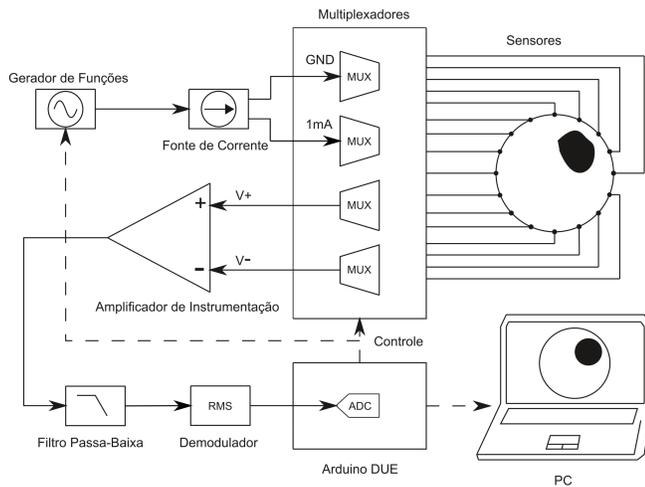


Fig. 1. Diagrama de blocos do tomógrafo desenvolvido.

A. Gerador de Funções e Fonte de Corrente de Howland Modificado

O circuito integrado (CI) utilizado - como o gerador de funções do sistema - é o módulo AD9850, que utiliza uma tecnologia de Síntese Digital Direta (DDS) para produzir digitalmente as ondas senoidais que geram a corrente de injeção. As frequências são controladas digitalmente pelo *Arduino Due*, e podem atingir valores maiores que 10MHz, o que é suficiente para obter as frequências médias requeridas no método. Na saída do gerador de funções, o sinal é condicionado por um amplificador e um capacitor de acoplamento, Fig. 2. A fonte de corrente controlada por tensão (VCCS) fornece na saída uma corrente bidirecional, independente da carga, controlada pela tensão na entrada. A fonte de corrente de *Howland* tradicional utiliza um amplificador operacional (op-amp) com realimentações positivas e negativas [21], [22]. No projeto do módulo da fonte de corrente, implementado no equipamento, é utilizado uma modificação com um op-amp seguidor na realimentação positiva. Este produz uma impedância de saída maior [21], Fig. 2 para os IC2A e IC2B. Considerando que todos os resistores são iguais, de R4 a R7, para o circuito mostrado na Fig. 2, a tensão na entrada está relacionada a corrente na saída, Eq. 1:

$$I_{out} = \frac{V_{in}}{R8} \quad (1)$$

onde I_{out} é a corrente de saída, V_{in} é a tensão de entrada e $R8$ é o resistor que ajusta o ganho da corrente.

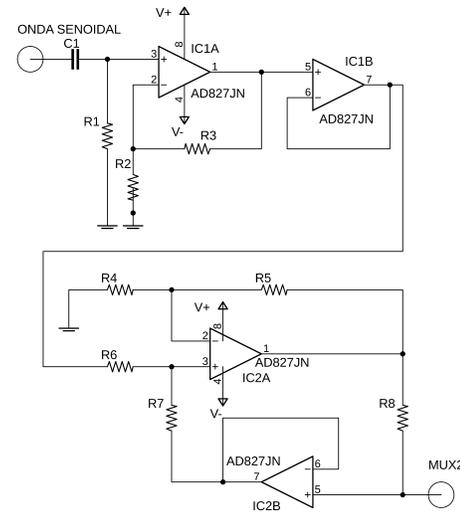


Fig. 2. Circuito de condicionamento do gerador de sinais e fonte de corrente de *Howland*.

Para a aumentar a impedância de saída, é importante que os resistores estejam perfeitamente casados [21]–[23]. Conseqüentemente, resistores de 1% ou de menor tolerância são desejáveis para a realimentação positiva e negativa. Os resistores e a tensão de entrada foram escolhidos de tal forma a prover uma corrente de 1mA RMS.

B. Amplificador de Instrumentação e Filtro Passa-Baixa

O amplificador de instrumentação tem por objetivo realizar a medição diferencial no equipamento. O efeito prático dessa aplicação é diminuir a faixa dinâmica do sinal a ser enviado ao A/D. Isso ocorre pois o sinal diferencial é significativamente menor ao sinal referenciado ao terra [24]. Outro fator que justifica sua utilização é a amplificação que o in-amp proporciona ao sinal, condicionando-o de acordo com a necessidade ao mesmo tempo que rejeita parte do sinal de modo comum presente na aplicação. O in-amp utilizado é o INA128, IC4, que apresenta uma razão de rejeição de modo comum (CMRR) adequada ao objetivo proposto, com uma boa relação custo/funcionalidade. O IC4 utiliza uma topologia de 3 op-amp, com seguidores nas entradas diferenciais. Esses seguidores têm a função de casar e aumentar as impedâncias de entrada, que influenciam minimamente o CMRR [25]. Antes da entrada no in-amp, o sinal passa por capacitores de acoplamento, C2 e C3 (Fig. 3) para então ser aplicado às entradas inversora e não-inversora do in-amp, Fig. 3. O resultado na saída é a diferença entre os sinais, Eq. 2, que ainda pode ser amplificado por um fator A ajustado por um resistor externo, R11, e de acordo com o *datasheet* [26], Eq. 3.

$$V_{out} = A(V_+ - V_-) \quad (2)$$

$$A = 1 + \frac{50 [k\Omega]}{R11} \quad (3)$$

O ganho utilizado para a condutividade elétrica de $74\mu S/cm$ é de 5,10.

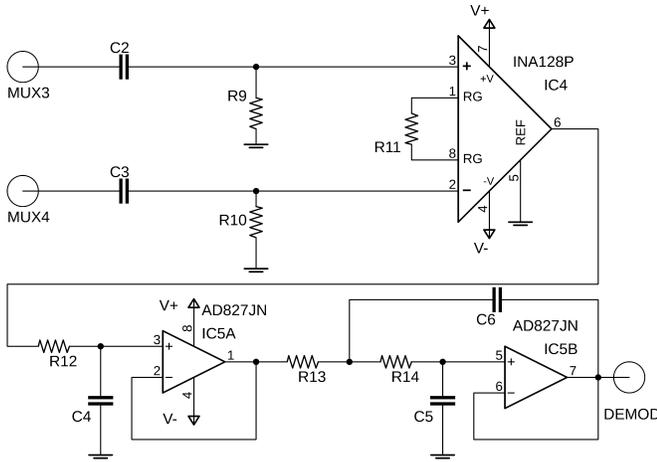


Fig. 3. Circuito do amplificador de instrumentação e filtro passa-baixa ativo de *Butterworth*.

Essa é a forma convencional de aplicação do amplificador de instrumentação, que utiliza 1 estágio para operar as tensões diferencialmente. Recentemente, Shi et al. [27] utilizaram uma topografia para aumentar o CMRR com três in-amps em dois estágios de ganho, que se pretende incorporar em versões posteriores do equipamento.

No desenvolvimento do equipamento é utilizado o filtro passa-baixa ativo de terceira ordem para rejeitar o ruído que degrada o sinal, Fig. 3. Esse filtro é de *Butterworth* com frequência de corte de 90kHz e de rejeição de 200kHz. A escolha dessa frequência de corte está relacionada à operação do equipamento, que sofre erros acentuados para frequências altas devido às capacitâncias parasitas [28]. Dessa forma, a banda máxima possível para o equipamento, apresentado no presente trabalho, é de 90kHz.

C. Demodulador

Para obter a informação da amplitude do sinal, a onda senoidal deve ser demodulada eficientemente. Para tanto, o CI AD536 é utilizado devido a sua simplicidade da aplicação, pois o sinal não necessita de tratamento digital, Fig. 4. Esse circuito integrado funciona com uma computação implícita do valor RMS do sinal, fornecendo na saída um sinal CC proporcional ao valor RMS do sinal de entrada. Por outro lado, essa simplicidade necessariamente vem com o custo da taxa de aquisição de imagens relativamente baixa, quando comparado a outros métodos. Isso é devido ao filtro passa-baixa interno no IC6 (Fig. 4) introduzir um tempo de acomodação dependente do capacitor C7 selecionado, Fig. 4. Selecionou-se valores baixos para C10 e R16, na saída do demodulador após o seguidor de tensão. Essa decisão foi tomada para evitar que estes influenciassem significativamente no tempo de acomodação do sistema. Dessa forma, o capacitor que domina o

processo permanece sendo o capacitor C7 do demodulador. É importante analisar a frequência e tempo de acomodação nesse CI para prover um sinal com um baixo erro [29], [30]. Note que, em frequências mais baixas, o erro aumenta e produz um sinal de baixa qualidade. Portanto, o valor mínimo de banda para o sistema apresentado foi definido em 20kHz. Esse tipo de demodulação somente obtém a parte real da impedância, pois é insensível às mudanças de fase da onda.

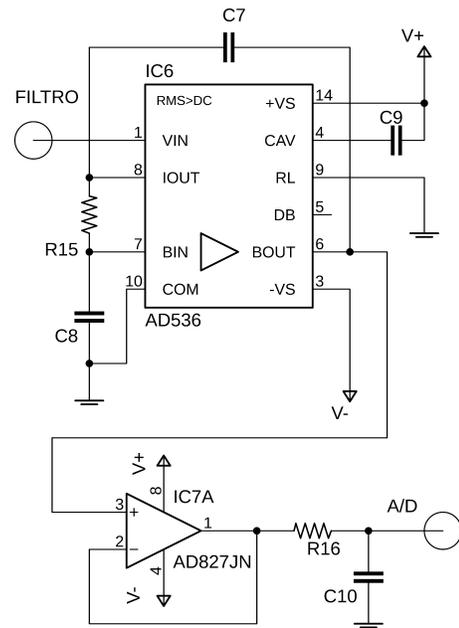


Fig. 4. Circuito do demodulador conversor *RMS-to-DC*.

D. Microcontrolador e Multiplexadores

Os multiplexadores usados como chaves para injetar corrente e medir tensões foram os CIs ADG506. A escolha é devido a sua faixa dinâmica superior a 30V diferencial e suas capacitâncias parasitas relativamente baixas [31]. O uso de multiplexadores confere ao sistema simplicidade, porém com adição de não-idealidades, como a resistência *on* das chaves e as capacitâncias parasitas. As 16 portas de todos multiplexadores são conectadas diretamente aos sensores. As entradas dos dois primeiros multiplexadores são conectadas ao terra e à saída da fonte de corrente. As saídas dos outros dois são conectadas às entradas do in-amp.

No projeto utilizou-se o *Arduino Due*, que é uma placa de prototipação microcontrolada. Essa placa utiliza o microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 [16], [32], que opera com um clock de 84MHz. O A/D possui 12 bits de resolução e uma frequência de conversão que pode chegar a 1MHz [32], o que se mostra suficiente para a aplicação desejada. O microcontrolador é responsável pelo controle das frequências das correntes de injeção, posição de injeção da corrente, distribuição das tensões nos sensores pelos multiplexadores, e pela comunicação entre o computador e o equipamento. Os sinais analógicos, medidos, são convertidos em digital no A/D. Esses sinais são utilizados para a reconstrução da imagem no computador.

III. ESTRUTURA DO SOFTWARE

O software escrito em *Octave* realiza a comunicação entre o *Arduino Due* e o computador, que transfere todos os dados referentes a uma imagem completa para a memória do programa. Realizada a aquisição de dados em um intervalo definido de tempo ou número de imagens, o software realiza a reconstrução utilizando as rotinas do software livre *Electrical Impedance Tomography and Diffuse Optical Tomography Reconstruction Software* (EIDORS), escritas em *Matlab* facilmente convertidos para *Octave*. Este disponibiliza diversas possibilidades de algoritmos de reconstrução, com diversas funcionalidades [33]. A imagem a ser reconstruída depende da resolução do problema direto e do problema inverso.

A. Problema Direto

O problema direto consiste em um domínio bidimensional Ω com uma condutividade elétrica σ , uma distribuição potencial escalar u no domínio, potencial U_l nos eletrodos do contorno $\partial\Omega$, onde uma corrente I_l é injetada. As equações que representam o fenômeno, chamado de Modelo do Eletrodo Completo, são descritas pelas Eq. 4-7 [24]:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla u) = 0 \quad \text{em } \Omega \quad (4)$$

$$u + z_l \sigma \frac{\partial u}{\partial n} = U_l \quad \text{em } e_l, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

$$\int_{e_l} \frac{\partial u}{\partial n} dS = I_l \quad \text{em } e_l, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (6)$$

$$\sigma \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad \text{em } \partial\Omega \setminus \cup_{l=1}^L e_l \quad (7)$$

onde n é a normal do contorno $\partial\Omega$, z_l é a impedância de contato, e_l é o l -ésimo eletrodo no contorno $\partial\Omega$. Para conferir existência e unicidade da solução, duas condições adicionais são necessárias. Para tanto, a conservação de cargas é dada pela Eq. 8

$$\sum_{l=1}^L I_l = 0 \quad (8)$$

e a determinação de um ponto de referência pela Eq. 9

$$\sum_{l=1}^L U_l = 0 \quad (9)$$

O modelo é implementado diretamente no software EIDORS e discretizadas pelo Método dos Elementos Finitos. A malha com elementos triangulares é obtida pelo software livre *Gmsh* para então ser resolvido.

B. Problema Inverso

O problema inverso consiste em resolver as funções regularizadas para obter estimações da condutividade elétrica no domínio. Para essa tarefa, a Minimização de Um Passo de *Gauss-Newton* pode ser utilizada, Eq. 10-11, [24], [34]:

$$\delta V = V_{meas} - V_{calc} \quad (10)$$

$$\delta \sigma = (J^T J + \alpha^2 L^T L)^{-1} (J^T \delta V + \alpha^2 L^T L (\sigma_{ref} - \sigma_0)) \quad (11)$$

onde V_{meas} é o conjunto de medidas de tensão, V_{calc} é o conjunto de tensões calculadas pelo problema direto, J é o jacobiano, $\delta \sigma$ é a condutividade estimada, σ_{ref} é a condutividade de referência, σ_0 é a condutividade inicial, L é a matriz de regularização e α é o parâmetro de regularização. O método é implementado no EIDORS. A matriz de regularização utilizada para a reconstrução das imagens é o chamado *Newton's One-Step Error Reconstructor* (NOSER). Este considera a diagonal da matriz Hessiana aproximada ($J^T J$) como a matriz de regularização [35]. O parâmetro de regularização escolhido é 0,001.

IV. MONTAGEM E SENSORES

O equipamento foi desenvolvido e soldado em placas de circuito impresso universais para testes. Um reservatório é montado em conjunto com eletrodos, de tal forma que minimize as diferenças entre o domínio real e o computacional. O reservatório foi feito de acrílico com um diâmetro total de 14,4cm, com 16 furos circunferenciais igualmente espaçados. Nesses furos, os sensores são posicionados para injeção de corrente elétrica e medição das tensões elétricas. Os sensores são de aço inoxidável e têm a forma de calota hemisférica, com um diâmetro de 18mm. O meio de teste é a água com uma condutividade elétrica de $74\mu S/cm$, porém o equipamento foi testado e funciona com valores tão altos quanto $1129\mu S/cm$. A Fig. 5 mostra os detalhes das placas de circuitos impresso montadas e o reservatório.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de avaliar a performance do equipamento, foram considerados: i) o erro máximo produzido pelas medições quando comparado ao problema direto, ii) a razão sinal-ruído (S/N) do equipamento e iii) a capacidade de aquisição quantificada pelo número de imagens por segundo. Tais parâmetros constam na Tabela I, considerando um valor de condutividade de $74\mu S/cm$ medido para a água obtida diretamente da torneira. É importante destacar que o aumento do erro para 16 eletrodos está relacionado a fatores como a correta posição dos eletrodos e a magnitude de injeção de corrente. Quanto maior é o número de eletrodos, mais sensível é o posicionamento destes e a baixa magnitude da corrente impacta negativamente na S/N, aumentando a densidade de erros randômicos.

Testes foram realizados com o intuito de avaliar o correto funcionamento do equipamento desenvolvido. Foram avaliadas reconstruções com o objeto se deslocando radialmente dentro do reservatório. A sensibilidade da tensão resultante relacionada com a condutividade da inclusão varia do ponto

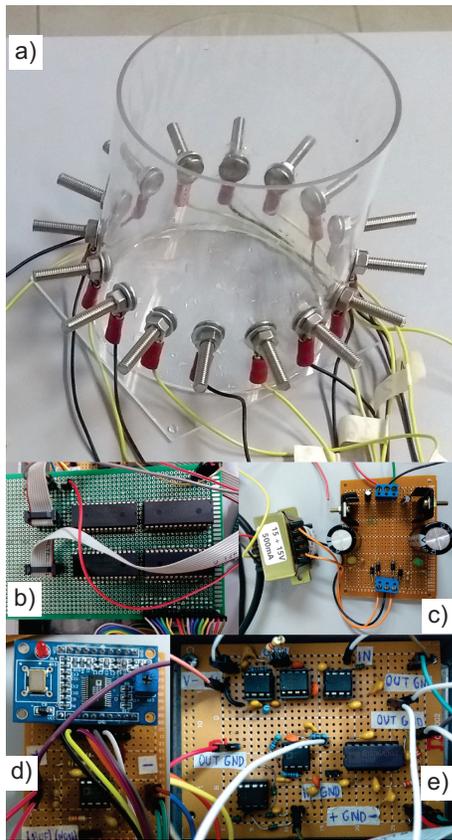


Fig. 5. Montagem do protótipo do equipamento para testes, (a) o reservatório de teste, (b) os multiplexadores, (c) a fonte de tensão, (d) o gerador de sinais com o acondicionamento, (e) fonte de corrente, filtro ativo passa-baixa e demodulador *RMS-to-DC*.

TABELA I
VALORES DE PERFORMANCE MEDIDOS NO EQUIPAMENTO.

Performance	8 Eletrodos	16 Eletrodos
Erro Máximo (%)	3,79	9,11
S/N (dB)	57,47	47,20
Imagens/s	30,61	6,41

mais alto próximo à parede ao mais baixo no centro do reservatório para o padrão adjacente [11]. Dessa forma, as imagens reconstruídas são investigadas na direção da variação de sensibilidade. Primeiramente foi testado reconstruções na região de menor sensibilidade, no ponto central, até a região de maior sensibilidade, próximo à parede. O primeiro teste foi feito com um corpo de teste de 51mm de diâmetro feito de um material não-condutor, o que corresponde à 12,54% da área do reservatório. Os resultados, Fig. 6, mostram que o método apresentou imagens corretamente posicionadas, Fig. 6a, tanto para a reconstrução com 8 eletrodos, Fig. 6b, quanto para 16 eletrodos, Fig. 6c.

O segundo teste constitui em um objeto confeccionado com um material condutivo de 49mm de diâmetro, o que corresponde a 11,57% da área do reservatório. Da mesma maneira, a imagem reconstruída com o algoritmo apresentou uma imagem com bom contraste e posicionada de acordo com a posição real, Fig. 7a, para aquisições com 8 eletrodos,

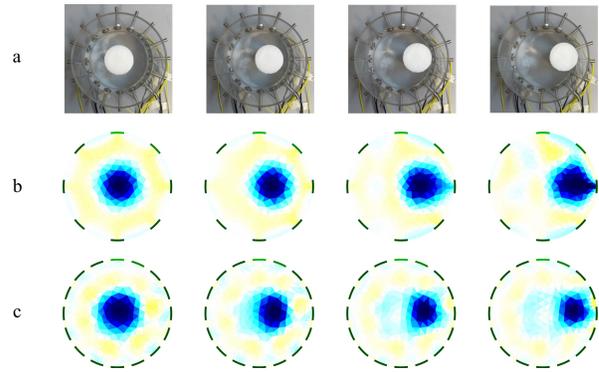


Fig. 6. Reconstrução de um objeto não-condutivo, em azul, no reservatório de teste. (a) Posicionamento do objeto dentro do reservatório, (b) Reconstrução da imagem utilizando 8 eletrodos, (c) Reconstrução da imagem utilizando 16 eletrodos.

Fig. 7b, e 16 eletrodos, Fig. 7c. Percebe-se que há uma imagem de diâmetro maior que o real para os corpos de teste condutivo e não-condutivo utilizando 8 eletrodos quando comparado à reconstrução com 16 eletrodos. Isso é esperado devido ao fato de que a acurácia da solução do problema inverso aumenta com a utilização de um maior número de medições independentes [11].

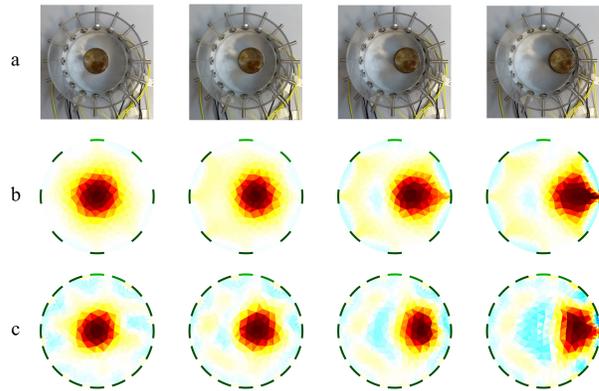


Fig. 7. Reconstrução de um objeto condutivo, em vermelho, no reservatório de teste. (a) Posicionamento do objeto dentro do reservatório, (b) Reconstrução da imagem utilizando 8 eletrodos, (c) Reconstrução da imagem utilizando 16 eletrodos.

No terceiro teste, avaliou-se a capacidade de reconstrução com diâmetros menores. Foi feito um teste com um material não-condutivo com um diâmetro de 21mm, o que corresponde à 2,12% da área do reservatório, Fig. 8a. Percebe-se que ambas reconstruções apresentaram imagens com o posicionamento satisfatório, porém o diâmetro da imagem reconstruída com 8 eletrodos está superestimada, Fig. 8b. A imagem com 16 eletrodos apresentou um baixo contraste, Fig. 8c. Todavia, essas questões não impedem a correta interpretação da imagem.

VI. CONCLUSÃO

O projeto de um sistema de aquisição responsável por prover medidas que possibilitam a reconstrução de imagens relacionada à condutividade elétrica do meio, através da

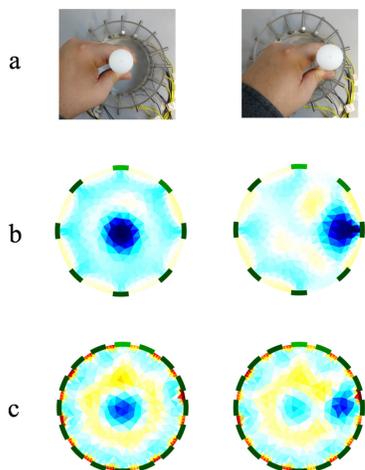


Fig. 8. Reconstrução de um objeto não-condutivo, em azul, com área de seção menor no reservatório de teste. (a) Posicionamento do objeto dentro do reservatório, (b) Reconstrução da imagem utilizando 8 eletrodos, (c) Reconstrução da imagem utilizando 16 eletrodos.

técnica de tomografia por impedância elétrica, é proposto no presente trabalho. A instrumentação é composta por sete módulos responsáveis por injetar as correntes elétricas e medir as tensões, transformando o sinal analógico em digital no processo. Esses módulos são o gerador de sinal, a fonte de corrente, os multiplexadores, o amplificador de instrumentação, o filtro passa-baixa, o demodulador *RMS-to-DC* e o *Arduino* com o A/D. Um reservatório de teste foi montado e imagens adequadas foram obtidas em três configurações diferentes. O equipamento possui a capacidade de reconstruir 30,61 imagens/s com 8 eletrodos e 6,41 imagens/s com 16 eletrodos com um S/N de 57,47dB e 47,20dB respectivamente. Para futuras versões do equipamento, pretende-se realizar mudanças primordialmente nos seguintes pontos: na fonte de corrente, que com resistências casadas a 0,1% de tolerância ou menor e mudanças na topografia (par balanceado *single-ended* para injetar uma corrente positiva e negativa igual), podem reduzir o erro associado à impedância de saída e ao sinal de modo comum; no amplificador de instrumentação, que utilizando três in-amps em dois estágios de ganho pode aumentar significativamente o CMRR do módulo; na implementação da demodulação digital que diminui o tempo de aquisição significativamente e possibilita a aquisição da informação da fase da onda, parte imaginária da impedância (demodulação síncrona); e finalmente, mudanças implementando a injeção através do padrão oposto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Petrobras pelo suporte financeiro e à agência brasileira Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

[1] R. Giguère, L. Fradette, D. Mignon, and P. Tanguy, "ERT algorithms for quantitative concentration measurement of multiphase flows," *Chemical Engineering Journal*, vol. 141, no. 1, pp. 305 – 317, 2008.

[2] B. S. Kim, A. K. Khambampati, Y. J. Hong, S. Kim, and K. Y. Kim, "Multiphase flow imaging using an adaptive multi-threshold technique in electrical resistance tomography," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 31, pp. 25 – 34, 2013.

[3] M. Bodenstern, M. David, and K. Markstaller, "Principles of electrical impedance tomography and its clinical application," *Critical Care Medicine*, vol. 37, no. 2, pp. 713 – 724, 2009.

[4] A. Romsauerova, A. McEwan, L. Horesh, R. Yerworth, R. H. Bayford, and D. S. Holder, "Multi-frequency electrical impedance tomography (EIT) of the adult human head: initial findings in brain tumours, arteriovenous malformations and chronic stroke, development of an analysis method and calibration," *Physiological Measurement*, vol. 27, no. 5, pp. S147–S161, 2006.

[5] C. R. Carrigan, X. Yang, D. J. LaBrecque, D. Larsen, D. Freeman, A. L. Ramirez, W. Daily, R. Aines, R. Newmark, J. Friedmann, and S. Horvorka, "Electrical resistance tomographic monitoring of CO₂ movement in deep geologic reservoirs," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 18, pp. 401 – 408, 2013.

[6] W. Daily, A. Ramirez, D. LaBrecque, and J. Nitao, "Electrical resistivity tomography of vadose water movement," *Water Resources Research*, vol. 28, no. 5, pp. 1429–1442, 1992.

[7] M. Wang, J. Jia, Y. Faraj, Q. Wang, C. gang Xie, G. Oddie, K. Primrose, and C. Qiu, "A new visualisation and measurement technology for water continuous multiphase flows," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 46, pp. 204 – 212, 2015.

[8] Z. Meng, Z. Huang, B. Wang, H. Ji, H. Li, and Y. Yan, "Air–water two-phase flow measurement using a Venturi meter and an electrical resistance tomography sensor," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 21, no. 3, pp. 268 – 276, 2010.

[9] A. Parvareh, M. Rahimi, A. Alizadehdakel, and A. Alsairafi, "CFD and ERT investigations on two-phase flow regimes in vertical and horizontal tubes," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, no. 3, pp. 304 – 311, 2010.

[10] B. H. Brown and A. D. Seagar, "The Sheffield data collection system," *Clinical Physics and Physiological Measurement*, vol. 8, no. 4A, pp. 91–97, nov 1987.

[11] F. Dickin and M. Wang, "Electrical resistance tomography for process applications," *Measurement Science and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 247–260, mar 1996.

[12] A. J. Wilson, P. Milnes, A. R. Waterworth, R. H. Smallwood, and B. H. Brown, "Mk3.5: a modular, multi-frequency successor to the Mk3a EIS/EIT system," *Physiological Measurement*, vol. 22, no. 1, pp. 49–54, feb 2001.

[13] A. J. Wilkinson, E. W. Randall, J. J. Cilliers, D. R. Durrett, T. Naidoo, and T. Long, "A 1000-measurement frames/second ERT data capture system with real-time visualization," *IEEE Sensors Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 300–307, April 2005.

[14] Mi Wang, Yixin Ma, N. Holliday, Yunfeng Dai, R. A. Williams, and G. Lucas, "A high-performance EIT system," *IEEE Sensors Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 289–299, April 2005.

[15] J. Jia, M. Wang, H. I. Schlaberg, and H. Li, "A novel tomographic sensing system for high electrically conductive multiphase flow measurement," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 21, no. 3, pp. 184 – 190, 2010.

[16] "Arduino," <https://www.arduino.cc/>, accessed: 2019-08-27.

[17] G. Bitella, R. Rossi, R. Boichicchio, M. Perniola, and M. Amato, "A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters," *Sensors*, vol. 14, no. 10, pp. 19 639–19 659, 2014.

[18] P. Teikari, R. P. Najjar, H. Malkki, K. Knoblauch, D. Dumortier, C. Gronfier, and H. M. Cooper, "An inexpensive arduino-based led stimulator system for vision research," *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 211, no. 2, pp. 227 – 236, 2012.

[19] L. J. Claros-Marfil, J. F. Padiál, and B. Lauret, "A new and inexpensive open source data acquisition and controller for solar research: Application to a water-flow glazing," *Renewable Energy*, vol. 92, pp. 450 – 461, 2016.

[20] Y. Zhang, R. Xiao, and C. Harrison, "Advancing hand gesture recognition with high resolution electrical impedance tomography," in *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA: ACM, 2016, pp. 843–850.

[21] A. Mahnam, H. Yazdani, and M. M. Samani, "Comprehensive study of howland circuit with non-ideal components to design high performance current pumps," *Measurement*, vol. 82, pp. 94 – 104, 2016.

[22] A. S. Tucker, R. M. Fox, and R. J. Sadleir, "Biocompatible, high precision, wideband, improved howland current source with lead-lag

compensation,” *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 63–70, Feb 2013.

- [23] P. Bertemes-Filho, A. Felipei, and V. C. Vincence, “High accurate Howland current source: Output constraints analysis,” *Circuits and Systems*, vol. 4, no. 7, pp. 451–458, 2013.
- [24] D. Holder, *Electrical Impedance Tomography: Methods, History and Applications*, ser. Series in Medical Physics and Biomedical Engineering. CRC Press, 2004.
- [25] L. Counts and C. Kitchen, *A Designer’s Guide to Instrumentation Amplifiers*, 3rd ed. Analog Devices, 2006.
- [26] *INA12x Precision, Low-Power Instrumentation Amplifiers datasheet (Rev. E)*, Texas Instruments, 2019.
- [27] X. Shi, W. Li, F. You, X. Huo, C. Xu, Z. Ji, R. Liu, B. Liu, Y. Li, F. Fu, and X. Dong, “High-precision electrical impedance tomography data acquisition system for brain imaging,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 14, pp. 5974–5984, July 2018.
- [28] K. G. Boone and D. S. Holder, “Current approaches to analogue instrumentation design in electrical impedance tomography,” *Physiological Measurement*, vol. 17, no. 4, pp. 229–247, nov 1996.
- [29] *AD536A: Integrated Circuit True RMS-to-DC Converter Data Sheet (Rev. G)*, Analog Devices, 2019.
- [30] D. Sheingold, Ed., *RMS-to-DC Application Guide*, 2nd ed. Analog Devices, 1986.
- [31] *ADG506A/ADG507A: CMOS 8-/16-Channel Analog Multiplexers Data Sheet (Rev. C)*, Analog Devices, 1998.
- [32] *SAM3X/SAM3A Series Datasheet*, Microchip, 2015.
- [33] A. Adler and W. R. B. Lionheart, “Uses and abuses of EIDORS: an extensible software base for EIT,” *Physiological Measurement*, vol. 27, no. 5, pp. S25–S42, apr 2006.
- [34] W. R. B. Lionheart, “EIT reconstruction algorithms: pitfalls, challenges and recent developments,” *Physiological Measurement*, vol. 25, no. 1, pp. 125–142, feb 2004.
- [35] M. Cheney, D. Isaacson, J. C. Newell, S. Simske, and J. Goble, “NOSER: An algorithm for solving the inverse conductivity problem,” *International Journal of Imaging Systems and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 66–75, 1990.



Bruno Furtado de Moura received the B.Eng. and M.Sc. degrees in Mechanical Engineering from the Federal University of Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brazil, in 2012 and 2014. Currently, he is involved in graduate studies to obtain a D.Sc. degree, developing electrical impedance tomography reconstruction software and hardware at UFES in partnership with the University of Santiago de Chile. His topics of interest are inverse problem, electrical tomography, and fluid flow modeling.



Marcio Martins is Professor of Thermal Science at the Department of Mechanical Engineering of UFES. His research is centered on multiphase reactive processes in thermal systems. The purpose of his work is to develop processes and systems to reduce the waste of energy and to find through the solid residues a way of energy recovering. He was born in Amazon (Brazil) and studied Mechanical Engineering at Federal University of Para (B.Eng. 2003, M.Sc. 2005), and after at the University of Toulouse (Ph.D. 2008). Marcio joined UFES in

2009.



Francisco Sepúlveda Palma obtained his bachelor’s degree in applied physics in 2004 and an M.Sc. degree in engineering physics in 2005 from the University of Santiago de Chile (Usach), Santiago, Chile. He received a Ph.D. from the University of Toulouse, in 2009. Since 2012, he is an Associate professor at the Department of Mechanical Engineering at Santiago University of Chile. He works on heat transfer modeling and their implementation in the field of inverse problems for infrared images. Also on ultrasonics and automation and control.



Wellington Betencurte da Silva is Professor of optimization and numerical methods in the Center of Agricultural Sciences and Engineering at the Federal University of Espírito Santo. His research is centered on mathematical modeling and state variable estimations via Bayesian filters applied to thermal science problems. He was born in Cachoeiro-ES (Brazil) and studied Mathematics at Fluminense Federal University (2006), Mechanical Engineering at Military Engineering Institute (M.Sc. 2008), and after his Ph.D. at the Federal University of Rio de Janeiro/ Ecole des Mines d’Albi-Carmaux (2012). Wellington joined UFES in 2013.



Jorge Acevedo Cabello is Assistant professor at the Department of Mechanical Engineering of Santiago University of Chile, where he graduated in Mechanical Civil Engineering in 2004. He received his Ph.D. from Polytechnic University of Catalonia, Barcelona, Spain, where he worked on experimental and numerical studies applied to continuous casting process.



Rogério Ramos is Professor of Thermal Science and head of the Nucleus for Oil and Gas Flow Measurement (NEMOG) at the Department of Mechanical Engineering at UFES. His research is centered on flow measurement for the petroleum industry, developing techniques of measurements for multiphase systems. He was born in Vitória-ES (Brazil) and studied Mechanical Engineering at UFES (B.Eng. 1988, M.Sc. 1993), and after held his Ph.D. at the Federal University of Rio de Janeiro/ Cardiff University (1999). Rogério joined UFES in 1994.