# SISTEMA DE MEDIÇÃO DE NÍVEL DE COMBUSTÍVEL NÃO INVASIVO COM CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA

Marcelo Eustáquio Hamanaka Silva<sup>\*†</sup> Vinícius Almeida de Mattos<sup>†</sup> Alan Kardek Rêgo Segundo<sup>†</sup> Sávio Augusto Lopes da Silva<sup>†</sup> Paulo Marcos de Barros Monteiro<sup>†</sup>

\* Instituto Tecnológico Vale

Ouro Preto, MG, Brasil

<sup>†</sup>Departamento de Engenharia de Controle e Automação Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto Ouro Preto, MG, Brasil

# E-mail: marcelohamanaka.ufop@gmail.com, vinicius.mattos131@gmail.com, alankardek@ufop.edu.br, saviolsil@gmail.com, pmemop@gmail.com

**Abstract**— The use of internal combustion engines is each time more frequent in activities carried out in society, both in the rural and urban sectors. However, the autonomy of these machines does not always proceed in synchrony with the evolution of their energy efficiency. In addition, low-cost and easy-to-calibrate systems are, increasingly, innovating the way to measure the effective fluid level in reservoirs, leaving aside conventional invasive methods. This article refers to the development of a level measurement system through the use of a non-invasive capacitive transducer, in which it takes advantage the characteristic casing construction of the reservoir for coupling, having as research object a fuel tank of a Briggs and Stratton's engine. The system also includes a wireless communication supervisory program, which automatically performs the calibration of the system by means of linear regression. The measurement is made from the oscillator method for capacitive measuring circuits. The processing platform developed is based on the PIC16F873A microcontroller and the technique of standard deviation and moving average was applied to its programming as a way of minimization of electromagnetic interference.

**Keywords**— Capacitive Transducer, Reservoirs Autonomy, Calibration by Linear Regression, Telemetry, Fuel Level Monitoring.

**Resumo**— A utilização de motores de combustão interna está cada mais frequente nas atividades desenvolvidas na sociedade, tanto no setor rural quanto no urbano. Todavia, a autonomia dessas máquinas nem sempre avança em sincronia com a evolução de sua eficiência energética. Além disso, sistemas de baixo custo e de fácil calibração estão, cada vez mais, inovando a maneira de se medir o nível efetivo de fluidos em reservatórios, deixando de lado os métodos invasivos convencionais. Este artigo refere-se ao desenvolvimento de um sistema de medição de nível por meio da utilização de um transdutor capacitivo não invasivo, em que aproveita a construção característica da carcaça do reservatório para acoplamento, tendo como objeto de pesquisa um tanque de combustível de um motor da Briggs and Stratton. O sistema também contempla um programa supervisório com comunicação *wireless*, que realiza automaticamente a calibração do sistema, por meio de regressão linear. A medição é feita a partir do método oscilador para circuitos de medição capacitivos. A plataforma de processamento desenvolvida é baseada no microcontrolador PIC16F873A e foi aplicada a técnica de desvio padrão e média móvel à sua programação como forma de minimização de interferências eletromagnéticas.

**Palavras-chave** Transdutor Capacitivo, Autonomia de Reservatórios, Calibração por Regressão Linear, Telemetria, Monitoramento de Nível de Combustível.

#### 1 Introdução

O uso de motores de combustão interna está sendo difundido cada vez mais, principalmente aplicados a veículos automotivos. Mas suas aplicações não se restringem a veículos convencionais de transporte de cargas e/ou passageiros. Consultando o manual do fabricante Briggs and Stratton, observa-se uma gama bem diversificada de exemplos de aplicações (rurais ou urbanas) para esse tipo de máquina mecânica, como motobombas, geradores, lavadoras de alta pressão, roçadeiras, tratores de jardinagem ou lavouras, torres móveis de iluminação (Stratton, 2018) e até veículos offroad para fins agrícolas ou recreativos. Atrelado ao aumento do número de aplicações e dos novos tipos de usuários, cria-se a necessidade de monitorar a autonomia desses motores de maneira eficaz

e de baixo custo, a fim de aumentar a eficiência do uso desses equipamentos nas diferentes tarefas por eles desempenhadas.

No que diz respeito à autonomia desses motores de combustão interna, muitas vezes os modelos disponíveis e amplamente difundidos no mercado não oferecem um reservatório de combustível compatível com a duração da aplicação para o qual são destinados. Nesse sentido, o desenvolvimento de sistemas de medição de nível (de baixo custo e de fácil instalação, calibração e manuseio) são uma alternativa para informar aos usuários a quantidade de combustível de forma precisa e em tempo real. O uso de sistemas que utilizam sensores capacitivos almejam buscar esse custo benefício (Pereira et al., 2016).

A construção característica do tanque alvo da pesquisa é representado na Figura 1, com capaci-

dade máxima de 3,6 L.



Figura 1: Corte transversal do tanque de combustível do motor Briggs & Stratton 1450 Series Horizontal OHV

Neste artigo é apresentado um sistema que utiliza um transdutor capacitivo não invasivo para medir as variações da constante dielétrica no interior do tanque de combustível do motor Briggs & Stratton 1450 Series Horizontal OHV (Stratton, 2018) influenciada pela proporção de gasolina e ar presentes a cada instante de tempo. A alteração da constante dielétrica, por sua vez, modifica o valor da capacitância lida do sensor que, em seguida, é convertida para um sinal digital. O processo de fabricação e os resultados iniciais do desempenho do transdutor deste trabalho foram apresentados no IEEE Sensors 2017 (Silva et al., 2017). No entanto, o sistema havia sido calibrado manualmente, em que várias curvas de ajustes aos pontos de calibração aferidos foram testadas, utilizando o método dos mínimos quadrados, até que se tivesse o maior coeficiente de determinação. O avanço reportado neste trabalho consiste na avaliação do desempenho e na apresentação detalhada da plataforma de processamento escolhida, bem como da disposição dos componentes eletrônicos na placa de circuito impresso. Além disso, apresenta-se, de modo detalhado, o protocolo de comunicação sem fio desenvolvido e o procedimento de calibração automática realizado pelo software supervisório, por meio de regressão linear implementada em seu código fonte.

O documento está organizado na seguinte ordem: na seção 2 apresentam-se os trabalhos relacionados; já a seção 3 é destinada à apresentação do design e funcionamento de todas as partes que compõem o sistema de medição. A seção 4 é destinada a avaliar os resultados obtidos e a seção 5 finaliza o trabalho com as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

#### 2 Trabalhos relacionados

O interesse no desenvolvimento de sensores capacitivos mais precisos vem aumentando nos últimos anos. Além disso, eles têm sido amplamente empregados em inúmeras aplicações industriais, inclusive em tarefas de análise e diagnóstico de máquinas (Anaraki, 2013). Gong et al. (2016) expõem em seu trabalho a utilização de sensores não invasivos, que configuram na maioria das vezes dispositivos caros, complexos e de difícil manuseio. No entanto, eles propõem um sensor capacitivo com face adesiva para medição de nível não invasiva em recipientes médico-hospitalares, com a variação capacitiva do sensor proporcional à área do eletrodo (espessura desprezível), explorando a fácil instalação e o baixo custo. Seu trabalho contempla as características de geometria específica dos eletrodos e boa linearidade, dispensando procedimento de calibração.

A vantagem de efetuar uma medição de nível não invasiva é evitar possíveis reações químicas indesejáveis entre o combustível e o eletrodo do elemento sensor (cobre maciço), além da ocupação de espaço físico de seus componentes no interior do reservatório. Por isso, o design não invasivo é o mais adequado em pesquisas relacionadas a constante dielétrica de líquidos (Anaraki, 2013). Em conjunto, tem-se também a vantagem de se utilizar o circuito oscilador como elemento de conversão do sinal capacitivo aferido, preservando a característica de baixo custo ao sistema, sem prejudicar sua qualidade metrológica.

Chetpattananondh et al. (2014) propõem um sistema de medição de nível de água com supervisório e comunicação serial cabeada. A técnica de geometria de eletrodo do elemento sensor adotada por ele foi similar ao de Gong (2016), mas com a abordagem capacitiva invasiva. A escolha da plataforma de processamento também foi similar à deste projeto (PIC16F877A), e os resultados observados apresentaram boa faixa de medição e resolução, conseguindo até detectar instantaneamente a formação de ondulações na superfície do líquido.

No trabalho de Souza e Mendonça (2016) é apresentado um sistema supervisório para usuários de sistemas automáticos controlados por CLP. Os autores ainda reafirmam que os sinóticos do supervisório devem apresentar características objetivas e essenciais do processo representado de maneira dinâmica e interativa, por meio de uma rede de comunicação robusta, capaz de conectar o conjunto de equipamentos (controladores e sensores) ao software desenvolvido. Os resultados alcançados tiveram um bom custo benefício comparados a sistemas similares encontrados no mercado, denotando que o desenvolvimento de sistemas de supervisão mais didáticos facilitam a interação do operador com o processo e o aprendizado.

As principais diferenças entre o sistema desenvolvido nesta pesquisa em relação às supracitadas são a construção embutida do elemento sensor e do circuito de conversão do transdutor capacitivo, sua facilidade de instalação no reservatório alvo desta pesquisa e no procedimento de calibração automática via supervisório. Diante dos distúrbios eletromagnéticos ao qual o protótipo construído em laboratório está submetido, é apresentado também um modelo de suavização desses efeitos por meio da utilização de um filtro digital, que baseia-se nos cálculos de desvio padrão e média móvel.

#### 3 Materiais e métodos

Nesta seção apresenta-se o sistema de medição de nível distinguindo-se os elementos de hardware e, em seguida, os de software, explicitando-se suas respectivas funcionalidades. É elucidado também o protocolo de comunicação sem fio e a lógica em que o supervisório se baseia, até chegar na informação remota final de nível de combustível.

A montagem do hardware e da parte eletrônica do sistema foi executada de forma simples, com materiais facilmente encontrados e de baixo custo.

A parte do software supervisório foi desenvolvida em plataforma *open-source* na linguagem de programação C Sharp, orientada a objetos.

### 3.1 Transdutor capacitivo

A construção física do transdutor capacitivo do sistema é representada pela Figura 2.



Figura 2: Construção física final do transdutor capacitivo.

O transdutor capacitivo não invasivo desenvolvido possui três eletrodos de cobre maciços alojados em uma placa de circuito impresso de fenolite, numa disposição triangular equidistante, de acordo com a Figura 2. Além disso, dois tarugos curto-circuitados funcionam como uma das placas do capacitor, e o terceiro tarugo funciona como a outra placa, estabelecendo o contato elétrico na placa de circuito impresso por pressão. Na mesma placa é alojado, então, o circuito integrado oscilador, o timer 555, para conversão do sinal analógico variável do elemento sensor em um sinal digital inversamente proporcional. O encaixe do transdutor no fundo do tanque de combustível, de maneira não invasiva, só é possível porque a construção do transdutor se adapta ao design exclusivo do reservatório de combustível do referido motor utilizado neste trabalho.

Na Figura 3, pode-se observar como é fácil e prático encaixar o transdutor no reservatório, sem necessidade de fixação permanente para efetuar a medição.



Figura 3: Demonstração do encaixe do transdutor na parte inferior do tanque de combustível.

#### 3.2 Circuito oscilador

De acordo com Pereira et al. (2016), circuitos osciladores servem apropriadamente para medições de baixas capacitâncias, oferecendo maior flexibilidade de configuração, operação em baixa frequência (neste trabalho, a ordem de grandeza manipulada foi de 1 kHz), estabilidade e menor custo. A faixa de variação da capacitância do elemento sensor está compreendida entre 5–15 pF.

O método oscilador funciona com a combinação do elemento capacitivo com um elemento resistivo ou com um elemento indutivo (RC ou LC), em que a frequência de oscilação desses circuitos depende da capacitância a ser medida. A utilização de oscilador RC para medidas capacitivas é o método mais popular para esse propósito, por meio de multivibradores, temporizadores, entre outros dispositivos. Entretanto, ele não é aconselhável para medições de capacitâncias menores que 0,01 pF, por oferecerem nessas condições, baixa imunidade a ruídos, baixa sensibilidade e baixa estabilidade da frequência produzida, sendo, portanto, necessárias técnicas sofisticadas de tratamento de dados para seu emprego prático em transdutores industriais (Huang et al., 1988).

Segundo Boylestad e Nashelsky (2004), o timer 555 é um dos temporizadores mais comuns e versáteis existentes atualmente, possuindo várias aplicações e com três configurações possíveis:

- 1. Monoestável: funciona como um gatilho (*trigger*) e possui aplicações como temporizadores, chaves imunes a ruído, interruptores de toque, dentre outras.
- Astável: funciona como um oscilador com aplicações em pisca-piscas, geradores de pulso, relógios, alarmes de segurança, dentre outras.
- Biestável: funciona como um flip-flop caso o pino 7 (DIS) não seja conectado e nenhum capacitor utilizado, em que a principal aplicação se encontra em chaves imunes a ruído.

A Figura 4 mostra um exemplar desse circuito integrado, operando como oscilador, na configuração escolhida para este trabalho.



Figura 4: Circuito oscilador em configuração astável implementado neste trabalho, alojado na mesma placa do elemento sensor.

De acordo com o *datasheet* (Instruments, 2010), a equação que determina a frequência de saída  $(V_o)$  no pino 3 do timer 555, é dada por

$$F_{osc} = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2)C_1},\tag{1}$$

em que  $F_{osc}$  é a frequência de oscilação de  $V_o$  dada em Hz,  $C_1$  é a capacitância variável do sensor dada em F,  $C_2$  é o capacitor fixo da configuração do circuito dado em F e  $R_1$  e  $R_2$  são as resistências fixas de configuração dadas em  $\Omega$ .

A configuração astável foi a escolhida para execução deste projeto, pois produz ondas quadradas oscilantes entre zero e a tensão de alimentação ( $V_{CC}$ ) a partir da variação da capacitância do elemento sensor, sendo fundamental para o tratamento de dados no microcontrolador escolhido. Os valores dos elementos fixos de configuração do circuito foram baseados no trabalho de Rêgo Segundo et al. (2010).

# 3.3 Unidade de Processamento de Sinais — UPS

A UPS desenvolvida possui três funções principais. A primeira seria a de converter o sinal de frequência proveniente do circuito oscilador em informação de nível, aplicando devidamente um tratamento estatístico corretivo para diminuir a influência de distúrbios eletromagnéticos na precisão final do sistema. A segunda consiste na exibição local da informação de nível processada (displays de sete segmentos multiplexados pela UPS). E a terceira função se resume no procedimento de envio, através da comunicação serial pela interface UART do microcontrolador, por meio de módulo XBee. Contudo, possui outras partes (descritas posteriormente) que desempenham papéis secundários e foram implementados para auxiliar a validação, manuseio e instalação do sistema.

Pode-se observar a representação virtual 3D, seguida da implementação real construída da placa de circuito impresso da UPS da Figura 5.



Figura 5: Vizualização 3D do projeto da UPS seguida de sua implementação física, alinhadas na mesma orientação.

A UPS, portanto, possui ao todo 9 partes gerenciadas pelo microcontrolador PIC16F873A, e uma breve descrição da função de cada uma delas

- é feita a seguir, ainda de acordo com a Figura 5:
  - 1. Recepção do sinal do transdutor;
  - 2. Saída para LED de alerta de erro no sistema<sup>1</sup>;
  - 3. Saída de dois bits de controle<sup>2</sup>;
  - Acesso aos cinco pinos de gravação do microcontrolador<sup>3</sup>;
  - Saída de um bit de controle e mais sete saídas para conexão de todos os displays de sete segmentos em paralelo;
  - 6. Saída para comunicação serial<sup>4</sup>;
  - 7. Alimentação Vcc e GND da UPS;
  - Saída para LED de alerta de reserva do tanque de combustível;
  - 9. Saída para conexão de LCD  $16x2^5$ .

Todas as placas de circuito impresso foram fabricados por meio de uma fresadora CNC e encapsulados individualmente em envólucros plásticos para instalação em laboratório. O fluxo de dados dos elementos supracitados são representados na Figura 6.



Figura 6: design esquemático do fluxo de dados do sistema de medição capacitivo não invasivo.

#### 3.4 Módulo de comunicação sem fio

Foi necessário implementar uma rede entre os dois módulos XBee, um transmissor e um receptor, estabelecendo-se, assim, uma comunicação em modo API entre o sistema embarcado e o supervisório instalado em um computador de mesa.

O protocolo estabelecido entre os módulos de comunicação sem fio foi desenvolvido com o intuito de se evitar a perda ou comprometimento dos dados. Consiste em um pacote de onze bytes no total, em que dois bytes são dedicados para validação dos dados transmitidos.

O pacote de dados é estruturado da seguinte maneira: o primeiro byte, chamado de start delimiter, é o parâmetro de reconhecimento do supervisório que indica o início do pacote de dados. Em seguida, tem-se dois bytes que determinam o tamanho do pacote que está sendo enviado, para que o supervisório antecipe qual o tamanho da informação a ser recebida — um byte mais significativo (msb) e um menos significativo (lsb). O próximo byte denota o tipo de pacote enviado (Frame Type), podendo indicar uma transmissão ordinária de dados, uma requisição ou um comando de configuração do XBee. Essa informação é prosseguida do byte de identificação (Frame ID) que confirma se o supervisório recebeu o pacote corretamente ou não. Depois tem-se mais dois bytes (Address), representando o endereço do módulo XBee que enviou o pacote de dados. Um byte opcional de informação (Optional Info) para caracterizar melhor o pacote e, finalmente, os dois bytes de informação de nível de combustível, após o processamento do microcontrolador, acompanhado de mais um byte de verificação dessa informação de nível (Check Sum). A Figura 7 apresenta o fluxograma de execução do pacote de dados do sistema, implementado entre os módulos XBee de comunicação sem fio, em modo API.





#### 3.5 Firmware do microcontrolador

O microcontrolador PIC16F873A utiliza um de seus módulos CCP em função *Capture* para medir o período do sinal de saída  $(V_o)$  do circuito oscilador. O PIC ainda filtra os dados durante o processo de amostragem, considerando a média e o desvio padrão de 50 repetições do sinal de frequência aferido. É retornada, então, a média dos valores dentro da faixa de dois desvios padrão, para

 <sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Caso transcorra muito tempo para acionar a interrupção que processa os dados do transdutor.
<sup>2</sup>Bits necessários para a multiplexação de displays de

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Bits necessários para a multiplexação de displays de sete segmentos, cada bit dedicado a um display.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>MCLR, PGD, PGC, GND e Vcc.

 $<sup>^4\</sup>mathrm{Conexão}$ dos pinos R<br/>x, Tx, Vcc e GND do PIC com o módulo transmissor X Bee.

 $<sup>^5\</sup>mathrm{LCD}$  dedicado para testes e simulações locais do sistema.

mais e para menos. O sistema considera, em seguida, como resultado de medição, a média móvel entre as últimas quatro medições de frequência filtrada pelo desvio padrão, de acordo com

$$M_{movel} = \frac{\sum_{i=1}^{4} M_i}{n},\tag{2}$$

em que i é o índice que indica a variação das médias aritiméticas que entram no cálculo da média móvel, n é o valor da quantidade total de médias aritiméticas consideradas, M são os valores de cada média aritimética respectivamente e  $M_{movel}$  é o valor da média móvel propriamente dito.

Em aplicações de medição de massa com sensoriamento capacitivo, por exemplo, o uso de filtros digitais implementados no sistema de medição foi bastante eficaz na influência dos parâmetros de repetibilidade, linearidade e resolução da amostragem (Chatterjee et al., 2014).

#### 3.6 Supervisório

O sistema supervisório desenvolvido neste trabalho foi projetado no software Visual Studio 2017 da Microsoft. Combinando-se a capacidade do software com a modularização de hardware, permite-se o desenvolvimento de sistemas de medição e controle complexos. Depois de realizar todos os testes necessários para a validação da aplicação desenvolvida, foi criado, então, o seu arquivo executável. Dessa forma, qualquer usuário pode instalar o supervisório em um computador com sistema operacional Windows ou Mac que consiga abrir uma canal de comunicação serial sem a necessidade de estar instalado o software Visual Studio.

A Figura 8 exibe as duas abas da janela principal da aplicação desenvolvida.



Figura 8: Painéis de Exibição (a) e Calibração (b) do supervisório.

Foi desenvolvida uma interface amigável com o usuário a partir de teclas, botões de pulso, dials (dispositivos de entrada), indicadores gráficos e sinalizadores analógicos geometricamente como dispostos nas telas da Figura 8.

Os parâmetros de configuração da porta serial, como a velocidade de transmissão (*baud rate*) padrão de 9600 bits por segundo, o tamanho do pacote de dados (*data bits*) comunicados por vez e o bit de parada (*stopping bit*) concordam com a configuração dos módulos XBee. Esses são os primeiros passos para inicializar a comunicação serial do sistema, localizados na parte superior da tela da Figura 8(a).

A tela representada na Figura 8(b) inicia a operação de calibração com a captura de duas (mínimo para calibrar) até doze amostras para gerar a regressão linear citada anteriormente. Ao lado dos campos para inserção dos volumes conhecidos de combustível, é mostrado por um ponteiro analógico a informação que chega já tratada da UPS. Após o preenchimento de cada volume associado à informação que chega, o evento de clique de cada botão Volume grava essa associação na memória do supervisório. A regressão linear é calculada a partir dos pontos obtidos do procedimento supracitado e exibida no gráfico de barras dessa mesma tela. O próprio programa, então, importa os dados para a tela da Figura 8(a) de exibição, já representando para o usuário a informação não tratada que chega da UPS (ponteiro analógico inferior na tela), concomitante à informação de nível de combustível (ponteiro analógico superior e gráfico de barras) recém calculada em unidades de volume (mL).

O sistema supervisório salva automaticamente em uma pasta as aquisições coletadas, que são armazenadas em um arquivo compatível com softwares de edição de texto, gerando um histórico de medições.

#### 4 Resultados e Discussão

As amostras utilizadas na calibração foram obtidas a partir da inserção de volumes conhecidos de combustível (gasolina comum), variando-os em 200 mL para cada patamar de nível, começando o procedimento com o tanque com o primeiro volume já inserido. Na Figura 9 mostra-se o ajuste aplicado à calibração, que reconstruiu o comportamento linear determinado pelo trabalho anterior (Silva et al., 2017). A adequabilidade do modelo pode ser verificada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que explica 99,14% da variância total das respostas. Em razão desse resultado, o modelo pode ser usado para estimar o comportamento da resposta dentro do intervalo de variação analisado.



Figura 9: Pontos de calibração do sistema de medição via supervisório, a partir de regressão linear automática.

O ajuste dos pontos obtidos pelo procedimento e calibração automática no supervisório foi

$$y = 12,3364x - 9411,9329,\tag{3}$$

em que y representa os níveis de volumes de referência utilizados, dados em mL e x representa os valores do timer medidos pela interrupção do microcontrolador, em que cada unidade corresponde a  $0, 2 \ \mu s$ .

Para validar o desempenho do procedimento de calibração automática do sistema, foi obtido outro modelo de validação para estimar o nível de combustível do tanque em 9 pontos distintos aos utilizados durante a calibração. Os resultados podem ser observados nas Figuras 10 e 11, que representam a curva de erros e o gráfico de correspondência, respectivamente. Na Figura 10, o cálculo da tendência (Td) das medidas realizadas durante o procedimento de validação consiste na diferença das indicações médias obtidas (mL) com o padrão de volume conhecido no interior do tanque de combustível (mL). O desvio padrão também foi calculado sobre as cinquenta amostras de cada nível medido e, posteriormente, a precisão (P) sob condições de repetibilidade. Esta última consiste em multiplicar o desvio padrão pelo coeficiente tde Student, que tem valor de aproximadamente 2quando o número de amostras é maior ou igual a 50. Portanto, a margem de incerteza do sistema é dada pela faixa de valores compreendidos entre  $Td\pm P$ , que determina a faixa dentro da qual se espera o erro aleatório a 95% de probabilidade. Na Figura 11, realizou-se uma comparação entre os volumes de referência (pontos de calibração) e os valores medidos pelo sensor, considerando a interseção no eixo das ordenadas igual a zero.

O método de avaliação do desempenho da calibração automática, portanto, seguiu a mesma sequência de parâmetros e mesma metodologia adotada para avaliar o sistema com a calibração manual.



Figura 11: Relação entre o nível referência e o nível previsto pelo sistema.

Os resultados metrológicos obtidos a partir do procedimento automático de calibração apresentaram alta exatidão para esta aplicação, com erro máximo de 2,10% (aproximadamente 75,9 mL), que ocorreu próximo à região em que a carcaça do tanque está mais distante do eletrodo do elemento sensor, por se tratar de um espaço tridimensional em formato de tronco de cone e o eletrodo maciço ser de formato cilíndrico.

#### 5 Conclusão

Diante dos resultados obtidos, fica evidente que implementação de uma calibração automática para este tipo de sistema de medição, somado ao fato de sua praticidade de instalação e manuseio, são extremamente vantajosas comparadas aos sistemas invasivos consultados na literatura. A qualidade metrológica desses resultados comparada com a alcançada pelo trabalho anterior apontam um nível de precisão equivalente dentro da expectativa de desempenho. Portanto, o custo-benefício do sistema de medição e da implementação do mecanismo de calibração automática foi alto, expandindo-se as potenciais aplicações em que ele possa vir a ser aplicado. É possível também a redução de custos com a substituição dos módulos de comunicação sem fio por dispositivos *indoor* mais simples e com alcance equivalente. O espaco economizado pela não utilização de dispositivos invasivos em contato com o combustível também diminui os custos se analisado o ponto de vista de manutenção a médio e longo prazo.

Em trabalhos futuros será desenvolvida uma instrumentação mais complexa do transdutor migrando-se alguns componentes fundamentais de processamento e comunicação para a mesma placa de circuito impresso, resguardando-o mais ainda da influência de outros tipos de interferências em sua amostragem. Almeja-se também efetuar melhorias funcionais no supervisório, disponibilizando ao usuário do sistema mais opções de ajustes aos pontos de calibração obtidos, elevando-se assim a qualidade metrológica do procedimento de calibração automática.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto — UFOP, ao Instituto Tecnológico Vale — ITV, à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Minas Gerais — FAPEMIG e à Coordenação para a Melhoria do Pessoal de Nível Superior — CAPES.

#### Referências

- Anaraki, P. A. (2013). Temperature effect on capacitance measurements of the different chemical liquids using a cylindrical capacitive sensor, *Science International* **25**(3).
- Boylestad, R. L. e Nashelsky, L. (2004). Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos, 8ª Ed. São Paulo: Prentice Hall.
- Chatterjee, K., Mahato, S., Chattopadhyay, S. e De, D. (2014). High accuracy mass measuring system using capacitive mass sensor, *Instruments and Experimental Techniques* 57(5): 627–630.
- Chetpattananondh, K., Tapoanoi, T., Phukpattaranont, P. e Jindapetch, N. (2014). A selfcalibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor, *Sensors and Actuators A: Physical* **209**: 175–182.
- Gong, C.-S. A., Chiu, H. K., Huang, L. R., Lin, C. H., Hsu, Z. D. e Tu, P.-H. (2016). Lowcost comb-electrode capacitive sensing device for liquid-level measurement, *IEEE Sensors Journal* 16(9): 2896–2897.
- Huang, S., Stott, A., Green, R. e Beck, M. (1988). Electronic transducers for industrial measurement of low value capacitances, *Journal of Physics E: Scientific Instruments* **21**(3): 242.
- Instruments, T. (2010). Lm555 timer datasheet. URL: http://http://www.ti.com/
- Pereira, R. G., Naik, D. A., Naik, S. S., Naik, S. D. e Cardoso, S. (2016). Capacitive sensor interfaced with arduino, *International Journal of*

Science Technology & Engineering 2(15): 90–95.

- Rêgo Segundo, A. K., Martins, J. H. e Monteiro, P. M. d. B. (2010). Desenvolvimento de sensor de teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para uso em irrigação, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Curso de pós graduação em engenharia agrícula, Viçosa.
- Silva, M. E. H., Rêgo Segundo, A. K. e Silva, S. A. L. d. (2017). Portable non-invasive capacitive transducer for measuring fuel level, *IEEE Sensors 2017.*
- Souza, T. d. e Mendonça, K. R. (2016). Sistemas automáticos didáticos controlados por CLP com monitoramento por sistema supervisório, XXI Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2016 p. 6.
- Stratton, B. . (2018). Catálogo briggs & stratton. URL: http://www.briggsandstratton.com/