DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE UMIDADE PARA GRÃOS DE CAFÉ UTILIZANDO O MÉTODO CAPACITIVO

Marcelo de Oliveira Pereira Pawlowski*†, Alan Kardek Rêgo Segundo*†, Diógenes Viegas Ferreira*†, Paulo Marcos de Barros Monteiro*†

Emails: marcelopaw@hotmail.com, alankardek@ufop.edu.br, viegas.diogenes@gmail.com, pmemop@gmail.com

Abstract— With 51.47 millions of bags and 287 thousands of registered producer until 2016, Brazil is the largest coffee producer in the whole world. With a meaningfull production and more than half of these producers categorized as small or mini, according to the Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, the brazilian agency that works with the field producers and fill the country with agricultural products), it is important that accessible instrumentation is available, seeking a fine production control. The coffee bean moisture is one of the most important parameters to have a final product with quality. The control of this parameter should be realized in the major part of the production process, as in drying, warehousing and roasting. In this work, a moisture sensor was developed, using a non-invasive capacitive method, as it's measurement circuit, with the purpose of making available to the producers a low cost and easy to manipulate tool – as many of these producers don't have knowledge in eletronics and computing. At the results, a 99,00% coefficient of determination was obtained between the reference moisture and the sensor moisture read of an Arabica coffee sample.

Keywords— agricultural instrumentation, grain moisture, capacitive sensor, coffee

Resumo— Com 51,47 milhões de sacas e 287 mil produtores registrados até 2016, o Brasil é o maior produtor de café do mundo. Com uma produção tão alta e um registro de mais da metade desses produtores sendo categorizados como pequenos ou mini, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), é importante que haja instrumentação acessível para que ocorra um pleno controle da produção. A umidade do grão de café é um dos parâmetros mais importantes para a obtenção de um produto final de qualidade. O controle desse parâmetro deve ser realizado ao longo de grande parte do processo produtivo do grão, como na secagem, armazenagem e torra. Diante deste contexto, neste trabalho foi desenvolvido um sensor de umidade utilizando-se o método capacitivo não invasivo, assim como seu circuito de medição, a fim de disponibilizar para os produtores uma instrumentação de baixo custo e de uso simples – já que muitos desses produtores não têm conhecimento em informática ou eletrônica. Nos resultados obteve-se coeficiente de determinação de 99,00% entre a umidade medida pelo sensor e a umidade de referência de uma amostra de café do tipo Arábica.

Palavras-chave— café, instrumentação agrícola, sensor capacitivo, umidade de grãos

1 Introdução

A quantidade de água presente no grão de café impacta diretamente nas propriedades e no preço de venda do produto. Com uma produção de 51,47 milhões de sacas no ano de 2016 e mais de 287 mil produtores, o Brasil é o maior produtor e o segundo maior consumidor dessa commoditie do mundo. Vale ressaltar que a maioria desses produtores pertencem à categoria de mini ou pequeno produtor, segundo o MAPA (2017) e a Conab (2017). Com números tão significativos, é importante para a renda do produtor e, consequentemente, para a economia do país, que se consiga produzir um café de qualidade e com alto valor agregado.

No entanto, equipamentos de instrumentação, sensores e maquinários agrícolas geralmente não são encontrados com facilidade no comércio dos pequenos centros urbanos, o que dificulta encontrar soluções pouco dispendiosas para os problemas enfrentados no campo pelo produtor rural, como por exemplo o controle da umidade de grãos de café, com o objetivo de melhorar a qualidade da produção.

Diante da importância da produção do café para a economia do país, é desejável que os produtores tenham acesso à tecnologias que auxiliem na gestão da qualidade do produto, para se obter maior rentabilidade. Para isso, no pós-colheita, um dos primeiros parâmetros a ser monitorado é a umidade do grão no processo de secagem, que afeta diretamente a eficiência do armazenamento, o sabor, o aroma e, consequentemente, o valor de venda. Na situação em que há, na região, a disponibilidade de um sensor de umidade de grãos calibrado para café, o valor é inviável para muitos dos produtores. A título de exemplo, existe o sensor Gehaka G610i que, de acordo com orçamento solicitado em 13/06/2017, custa R$2825,00 (Ind. Com. Eletro Eletrônica Gehaka Ltda., 2017).

Em algumas lavouras utiliza-se o conhecimento empírico e popular para obtenção do produto final a ser comercializado, mas que possui precisão duvidosa e pouco ou nenhum embasamento científico. Tendo em vista o contexto descrito, desenvolveu-se um sensor de baixo custo para medir umidade de grãos de café, de notável precisão e fácil utilização, para atender às necessidades do produtor.

2 Materiais e métodos

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Automação Predial (LAP) e no Laboratório de

Controle e Automação Multiusuário (LABCAM) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), e subdividido em três etapas:

- construção da caixa acrílica que serve como recipiente para a amostra de grãos e estrutura para fixação da placa do circuito de medição;
- construção do elemento sensor, com base no método capacitivo, e o circuito responsável pelo condicionamento de sinais;
- apresentação e análise dos resultados da calibração e testes de funcionalidade.

3 Construção e desenvolvimento do sensor

A determinação da quantidade de água presente nos grãos de café é realizada por meio da medição indireta da constante dielétrica do material presente entre duas placas metálicas posicionadas paralelamente uma a outra, onde a amostra de café é depositada.

"Capacitância é uma medida da quantidade de carga que o capacitor pode armazenar em suas placas; em outras palavras, é sua capacidade de armazenamento. Quanto mais alto o valor dessa capacitância, maior a quantidade de carga armazenada nas placas para a mesma tensão aplicada"(Boylestad, 2003).

Os sensores capacitivos atuam usando como parâmetro o campo elétrico gerado pelo próprio capacitor. O campo varia de acordo com a área e a distância entre as placas, além da constante dielétrica do meio. Os capacitores são utilizados em circuitos para tratamento e manipulação de sinais como, por exemplo, em circuitos osciladores, de filtragem, de saída e retificadores de sinal. Os sensores capacitivos não exigem o contato direto com a grandeza mensurada e, por isso, permite uma flexibilidade de instalação e operação (Hamanaka et al., 2017).

Dessa forma, durante a análise da umidade do café, o material dielétrico do capacitor é formado por grãos, ar e água presente dentro dos grãos, sendo a quantidade de água (ou a umidade) o único parâmetro variável. A relação entre a capacitância do sensor, a constante dielétrica e suas características geométricas é dada por

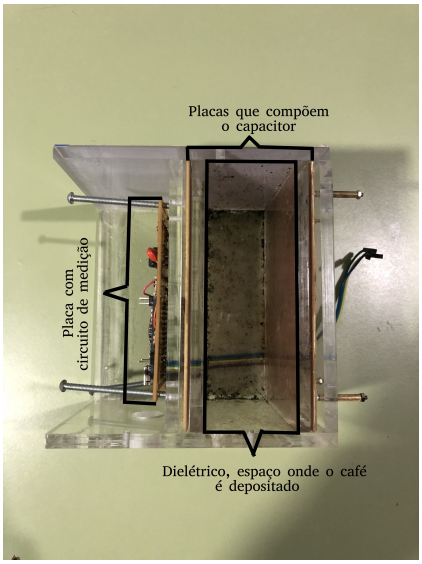
$$C = \frac{A}{d}\epsilon_0\epsilon_r, \tag{1}$$

em que:

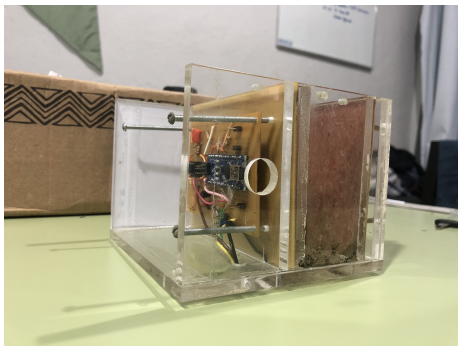
- C é a capacitância (F);
- A é a área das placas paralelas (m^2);
- d é a distância entre as placas paralelas (m);
- ϵ_r é a constante dielétrica relativa do material localizado entre as placas; e
- ϵ_0 é a constante dielétrica do vácuo.

Na construção foram utilizadas placas de acrílico de 6 mm de espessura, placa de fenolite com camada de cobre virgem e cabos de 1 mm de diâmetro.

Cortou-se duas placas de acrílico com 122 por 90 mm, quatro com 120 por 90 mm e uma com 132 por 122 mm e montou-se com uma diagramação favorável ao posicionamento das placas paralelas, da amostra de grãos e da placa de circuito. Essa montagem foi feita utilizando clorofórmio para fundir e aderir as placas de acrílico umas às outras. A estrutura construída pode ser visualizada na Figura 1.



(a)



(b)

Figura 1: Vistas superior (a) e lateral (b) do sistema de medição

4 Circuito de medição

O circuito integrado (CI) LM555 é extremamente estável para criar oscilações e *delays*, com terminais de disparo controlado ou *reset*, se necessário. Por ter sido lançado há mais de quarenta anos, ser amplamente utilizado e ter boa estabilidade, o CI possui baixo custo de compra e atende às necessidades deste projeto.

Ele pode atuar em três modos (Hamanaka, 2017; Texas Instruments, 2000; Rêgo Segundo, 2010; Boylestad, 2003):

1. Monoestável: funciona como um gatilho (*trigger*) e tem aplicações como temporizadores, chaves imunes a ruído, interruptores de toque, dentre outras;

2. 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;

3. Astável: quando em modo astável ele irá se autoativar e operar como um multivibrador. O capacitor externo carrega e descarrega por meio de $R_A + R_B$. Assim, o ciclo de trabalho (*dutycycle*) deve ser definido de acordo com esses dois resistores.

Utilizando um LM555 no modo astável pode-se obter uma onda quadrada com frequência inversamente proporcional à capacitância C do sensor, a única variável que não é constante, explicitado pela equação

$$f_{osc} = \frac{1,44}{(R_A + 2R_B)C_S}, \tag{2}$$

em que:

- f_{osc} é a frequência de oscilação da onda (Hz);
- R_A e R_B são resistências fixas (Ω); e
- C_S é a capacitância do sensor (F);

Dessa forma, utilizando um Arduino Nano, tem-se como entrada no microcontrolador uma onda quadrada, gerada pelo LM555. O microcontrolador foi programado para medir o período da onda, ou seja, o tempo entre duas bordas de subida do sinal. O circuito desenvolvido neste trabalho é ilustrado na Figura 2.

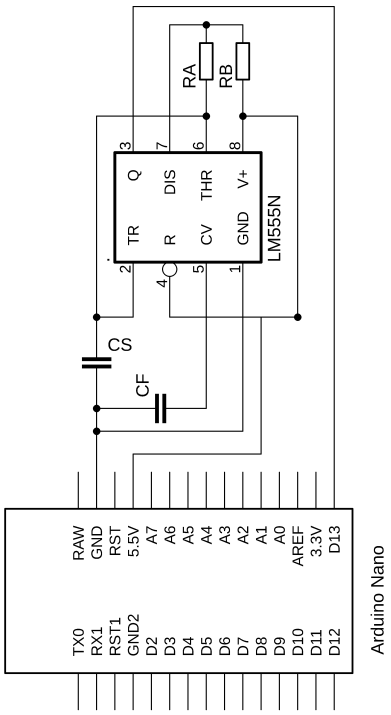


Figura 2: Circuito esquemático do LM555 em modo astável conectado no Arduino Nano, em que C_S é o capacitor-sensor, R_A e R_B são resistências e C_F é um capacitor utilizado como filtro.

Cada saída é resultado da leitura de 100 amostras armazenadas em um vetor e coletadas a cada 100 ms. Aplica-se nos dados do vetor um filtro digital que consiste em calcular o desvio padrão dos valores e, em seguida, preenchendo-se o mesmo vetor somente com valores dentro da faixa compreendida pela média mais ou menos o desvio padrão, e descartando-se os outros valores. Posteriormente, calcula-se novamente a média dos valores que foram admitidos pelo filtro de desvio padrão, obtendo-se assim, a saída final do período da onda, disponível via porta serial.

5 Calibração

A calibração do sistema desenvolvido neste trabalho foi realizada por meio do método gravimétrico. Trata-se de um dos métodos mais precisos e práticos utilizados para calibração de instrumentos de medição de umidade de meios porosos, sendo considerado o método padrão de referência. Ele é baseado na remoção de água da amostra que, no caso deste trabalho, foi o café. A água é removida por meio de secagem, usando-se uma estufa (Bhushan N. Patil, 2015). Uma vez removida, a diferença entre o peso do material úmido e o material seco é utilizada para calcular a umidade, já que se extrai toda, ou quase toda, a água presente na amostra, chegando o mais próximo possível da massa seca do material. Tendo a massa da amos-

tra saturada é possível calcular a quantidade de água que foi perdida e, a partir daí, encontrar a umidade inicial da amostra. A umidade em massa do material é calculada como

$$U_p = \frac{m_m - m_s}{m_s}, \tag{3}$$

em que:

- U_p é a umidade em massa dos grãos de café (kg/kg);
- m_s é a massa do grão seco, após o procedimento na câmara climatizada (kg); e
- m_m é a massa molhada, massa do café saturado, antes do procedimento na câmara climatizada (kg).

O café foi previamente saturado com água durante 12 horas, de modo que a amostra inicial de 300 gramas chegou ao final com 584 gramas. Em seguida, parte dos grãos foram depositados no recipiente do sensor até que ele ficasse cheio, e colocado em uma câmara climatizada KPK200, que manteve a temperatura e a umidade constantes a 55°C e 30% de umidade relativa do ar. Utilizando-se uma célula de carga conectada ao Arduino Nano embarcado no sensor, foi feita a aquisição de dados via porta serial, referente à massa da amostra, ao período da onda gerada pelo LM555 e à temperatura, medida por um sensor LM35. Na Figura 3 apresenta-se a estufa utilizada.

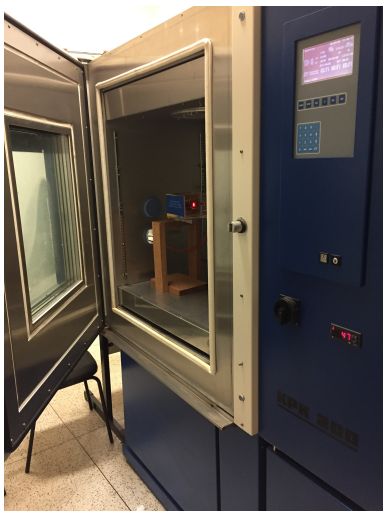


Figura 3: Calibração na câmara climatizada KPK200

Realizando leituras de temperatura, massa e período da onda a cada 2,5 segundos, calculou-se uma média e desvio padrão horário desses valores durante as 261 horas de processo. Assim, foi possível perceber a variação do período da onda gerada pelo LM555 e, consequentemente, da capacitância – de acordo com a perda de água por vaporização.

Quando a variação da massa se tornou próxima de nula, a câmara climatizada foi desligada e o conjunto sensor com o café e a célula de carga retirados. Em seguida, os grãos de café foram passados para um recipiente metálico que suportasse a temperatura de 95ºC, necessária para a retirada da água remanescente nos grãos. Não seria possível realizar este processo nessa temperatura na caixa acrílica, já que nela está o Arduino Nano, cujo microcontrolador (Atmega328p) tem temperatura máxima de operação de 85ºC, segundo seu datasheet (Atmel Corporation, 2016).

Passadas três horas, retirou-se os grãos da câmara climática e, utilizando a célula de carga, realizou-se a pesagem de modo a obter a massa dos grãos secos, associados a pesagem realizada com os grãos ainda saturados, obteve-se os dados apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Massas iniciais e finais da amostra

Saturado	228,93 g
Seco	129,56g
Umidade perdida	99,37g

6 Resultados

Manipulando a Equação 2 e tendo em vista que

$$f_{osc} = \frac{1}{T}, \tag{4}$$

em que:

- T é o período da onda (s);

é possível obter a equação

$$C_S = \frac{1,44P}{R_A + 2R_B}. \tag{5}$$

Por meio da Equação 5 é possível obter a capacitância em função do sinal de saída do LM555. Logo, foi realizada uma regressão linear entre a capacitância e umidade do café, obtida pelo método gravimétrico, de acordo com a Figura 4, obtendo-se:

$$U_m = 6,63.10^{-2}C_s - 2,846, \tag{6}$$

em que:

- U_m é a porcentagem de água no grão (kg/kg); e
- C_s é a capacitância do elemento sensor (pF).

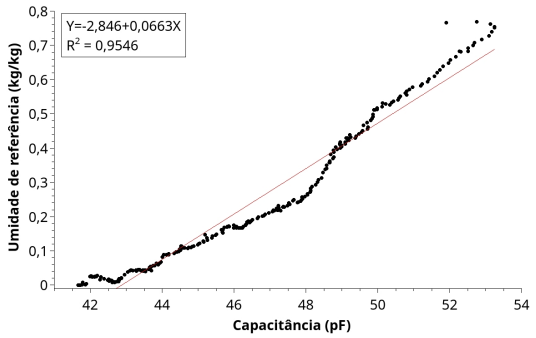


Figura 4: Regressão linear entre a capacitância (pF) e a umidade em peso do café (kg/kg)

O coeficiente de determinação da regressão foi de 95,46%, indicando que o modelo encontrado explica bem a variação dos dados observados.

Para avaliar a correspondência entre a umidade obtida pelo método gravimétrico e a umidade medida pelo sensor desenvolvido neste trabalho, realizou-se uma regressão linear (Figura 5) entre essas variáveis, com interseção no eixo das ordenadas igual a zero.

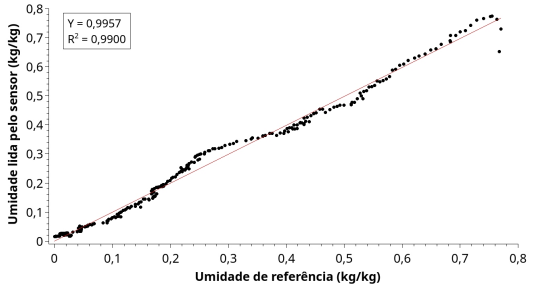


Figura 5: Gráfico de correspondência entre a umidade obtida pelo método gravimétrico e a umidade medida pelo sensor

7 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um sensor capacitivo para medição de umidade de café. O sistema apresentou coeficiente de determinação de 99,00% entre a umidade de referência e a umidade medida pelo sensor, indicando o alto desempenho apresentado pelo sistema.

Portanto, o sensor desenvolvido se mostra uma alternativa eficiente na medição da umidade de grãos de café, atendendo às expectativas de um produto simples, com baixo custo e que atenda as necessidades do produtor. Além disso, por ter um princípio simples e versátil, não há restrições no uso dele para a medição da umidade de outros grãos, sendo necessária a realização de calibrações específicas.

Para trabalhos futuros busca-se aprimorar a leitura dos dados e reduzir ruídos que possam eventualmente ter prejudicado os resultados. Planeja-se, então, a construção de uma estrutura em metal para comportar o sistema, de modo que o capacitor com a amostra de café fique protegido de interferências externas como campos eletromagnéticos, além de uma placa de circuito impresso para o circuito de medição. Cogita-se também a realização de testes com placas de aço inoxidável ao invés de fenolite, evitando problemas advindos da oxidação a longo prazo que afetariam a exatidão do sensor.

8 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Fundação Gorceix e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), em especial o Departamento de Engenharia de Controle e Automação (DECAT) pelo suporte que tornou este estudo possível.

Referências

Atmel Corporation (2016). Datasheet: ATmega328/P 8-bit AVR microcontrollers, datasheet complete. Eletronic Publication.

Bhushan N. Patil, P. H. Zope, K. S. P. (2015). Development of low cost TDR system for soil moisture measurement, *International Journal of Advanced Research in Education Technology (IJARET)* .

Boylestad, R. L. (2003). *Análise de circuitos*, 12 edn, Pearson Education do Brasil.

Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) (2017). Café no brasil, disponível em: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/cafe/cafeicultura-brasileira. Recuperado em 16 de novembro de 2017.

Hamanaka, M. E. (2017). Sistema de Medição de Nível de combustível e Telemetria para o veículo do Projeto Baja da UFOP. Monografia (Bacharel em Engenharia de Controle e Automação), UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto), Ouro Preto, Brasil.

Hamanaka, M. E., Segundo, A. K. R. and da Silva, S. A. L. (2017). Portable non-invasive capacitive transducer for measuring fuel level, *2017 IEEE SENSORS*, pp. 1–3.

Ind. Com. Eletro Eletrônica Gehaka Ltda. (2017). Gehaka G610i, https://www.gehaka.com.br/produtos/linha-agricola/medidor-de-umidade-de-graos-portatil/g610i.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (2017). Café no brasil, disponível em: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/cafe/

cafeicultura-brasileira. Recuperado em 16 de novembro de 2017.

Rêgo Segundo, A. K. (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 (mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa.

Texas Instruments (2000). Datasheet: LM555 Timer. Eletronic Publication.