

GUILHERME DE MOURA ARAÚJO

**SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE
ÁGUA E MASSA ESPECÍFICA APARENTE DE FEIJÃO E MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A663s
2018

Araújo, Guilherme de Moura, 1991-
Sistema de baixo custo para determinação do teor de água e
massa específica aparente de feijão e milho / Guilherme de
Moura Araújo. – Viçosa, MG, 2018.
xiv, 51 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 45-51.

1. Agricultura de precisão. 2. Detectores. 3. Ceifeiras.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

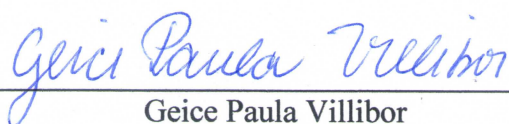
CDD 22. ed. 631.3

GUILHERME DE MOURA ARAUJO

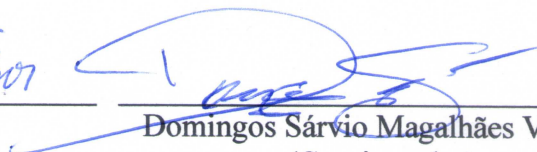
**SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE
ÁGUA E MASSA ESPECÍFICA APARENTE DE FEIJÃO E MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

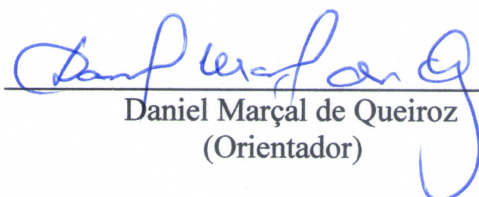
APROVADA: 16 de agosto de 2018.



Geice Paula Villibor



Domingos Sárvio Magalhães Valente
(Coorientador)



Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

À minha mãe Ivanise Aparecida de Moura e à minha tia Mirtes Conceição de Moura, pelo amor incondicional, apoio nos momentos difíceis, confiança e investimento.

DEDICO

“Depois que paramos de aprender começamos a morrer”

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

A minha família, que sempre esteve ao meu lado, me apoiou e me incentivou em todas as decisões tomadas.

A Deus por me tranquilizar em todos os momentos difíceis.

Aos meus amigos de república, Antonio João, Wilson, Adênio e André, pelo apoio, ensinamentos e incentivo.

A minha namorada Leticia, pelo apoio incondicional e incentivo na execução deste projeto.

A Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao professor Daniel Marçal de Queiroz, pela orientação, confiança, paciência e ajuda.

Aos professores Murilo Aparecido Voltarelli e Marcos Alexandre Teixeira, pela parceria, incentivo e ajuda.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas de laboratório, em especial a André, Fernando, Samira, Lucas, Emanuel, Amélia e Marcelo pela amizade e companheirismo.

Ao colega Lucas do programa de Armazenamento e Processamento pós-colheita, pela ajuda.

Ao amigo Ramon pelo incentivo, conselhos e amizade.

Enfim, a todos que me ajudaram de alguma forma na execução desse projeto, o meu muito obrigado.

BIOGRAFIA

Guilherme de Moura Araújo nasceu na cidade de Belo Horizonte - MG, filho de Ivanise Aparecida de Moura e Paulo Márcio Araújo.

Realizou o ensino médio na Escola Estadual Dom José Gaspar, no município de Araxá/MG, e ingressou no curso de graduação de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal Fluminense (UFF) no ano de 2011.

No intervalo de julho de 2014 a agosto de 2015 fez intercâmbio na *The University of Tennessee, Knoxville*, na cidade de Knoxville - Estados Unidos, retornando posteriormente para a UFF.

Colou grau em janeiro de 2017.

Em março de 2017 ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de mestrado, pelo Departamento de Engenharia Agrícola, no setor de Mecanização Agrícola, submetendo-se à defesa da dissertação em agosto de 2018.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença de potencial em um capacitor durante seu carregamento	9
Figura 2 – Diagrama de funcionamento da rotina executada no microcontrolador... 14	14
Figura 3 – Vista superior (a) e inferior (b) em perspectiva do sistema proposto..... 15	15
Figura 4 – Inserção de grãos no sensor (a) remoção do excesso destes (b) e grãos em contato com o sensor de temperatura e umidade relativa do ar (c)..... 16	16
Figura 5 – Células de carga YZC-161 e módulo HX711, utilizados para medir a massa de grãos no sistema..... 17	17
Figura 6 – Circuito elétrico utilizado para medir capacitâncias inferiores a 1 nF (a), superiores a 1 nF (b) e circuito implementado no microcontrolador. 18	18
Figura 7 – Circuito do sensor AM2302 para estimar o teor de água dos grãos. 21	21
Figura 8 – Materiais utilizados para calibrar o sensor de massa específica aparente (a) e balança de peso hectolítrico utilizada (b). 22	22
Figura 9 – Calibração do Sensor de massa específica aparente a 20,1 °C e umidade relativa do ar igual a 60,0 %..... 28	28
Figura 10 – Diagrama de dispersão do relacionamento entre os valores de massa específica aparente determinados por meio de balança hectolítrica e os valores estimados pelo sensor para os grãos de feijão..... 30	30
Figura 11 – Diagrama de dispersão do relacionamento entre os valores de massa específica aparente determinados por meio de balança hectolítrica e os valores estimados pelo sensor para os grãos de milho. 30	30
Figura 12 – Calibração do sensor de teor de água dos grãos pelo método dielétrico para os grãos de feijão a 20,1 °C e umidade relativa do ar igual a 60,0 %..... 32	32
Figura 13 – Calibração do sensor de teor de água dos grãos pelo método dielétrico para os grãos de milho a 20,1 °C e umidade relativa do ar igual a 60,0 %..... 32	32

Figura 14 – Re-calibração do sensor de teor de água dos grãos pelo método dielétrico para os grãos de milho a 20,1 °C e umidade relativa do ar igual a 60,0 %.....	34
Figura 15 – Diagrama de dispersão do relacionamento entre o teor de água determinado pelo método padrão da estufa com os valores estimados pela equação de calibração do método dielétrico para amostras de feijão.	35
Figura 16 – Diagrama de dispersão entre os valores de teores de água determinados pelo método padrão de estufa e valores estimados pela equação de calibração do método dielétrico para amostras de milho.	35
Figura 17 – Diagrama de dispersão para validação dos modelos analisados.....	37
Figura 18 – Variação da umidade relativa do ar em função do tempo medida por quatro diferentes sensores AM2302.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros das Equações modificadas de Henderson (Equação 1), de Chung-Pfost (Equação 2), de Halsey (Equação 3) e de Oswin (Equação 4) para diversos produtos.	12
Tabela 2 – Tempo de resposta do sensor de massa específica aparente	39
Tabela 3 – Tempo de Resposta do sensor de teor de água dos grãos pelo método dielétrico.....	40
Tabela 4 – Tempo de Resposta do sensor de teor de água dos grãos por meio de equações de equilíbrio higroscópico	40
Tabela 5 – Caracterização dos custos dos componentes utilizados para desenvolver o sistema de medição de massa específica aparente e teor de água.	42

RESUMO

ARAÚJO, Guilherme de Moura, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2018. **Sistema de Baixo Custo para Determinação do Teor de Água e Massa Específica Aparente de Feijão e Milho**. Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Domingos Sárvio Magalhães Valente e Pedro Amorim Berbert.

Os recentes avanços das tecnologias de sensores e automação de sistemas tornaram possível o desenvolvimento de máquinas e implementos para aplicação de insumos à taxa variável, e viabilizaram o desenvolvimento da agricultura de precisão. Um componente essencial da agricultura de precisão é o monitor de produtividade, sistema composto por diversos sensores com objetivo de medir a produtividade em cada ponto da lavoura, durante a colheita. Os dados medidos no campo permitem gerar mapas de produtividade, auxiliando ao produtor a planejar a safra seguinte e decidir qual o melhor uso/manejo de sua terra. No Brasil, apenas as máquinas colhedoras autopropelidas são comercializadas com monitores de produtividade sendo empregadas apenas em grandes fazendas, devido ao seu elevado custo de aquisição. Dentre os componentes do monitor de produtividade destacam-se o sensor de teor de água. O sensor de massa específica aparente geralmente não é utilizado em máquinas com base em fluxo volumétrico, o fluxo mássico é determinado utilizando uma massa específica única para todo o campo fornecida pelo usuário do sistema, o que reduz a exatidão da determinação da produtividade. Nesse sentido, esse trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver um sistema de baixo custo, capaz de determinar a massa específica aparente e o teor de água para grãos de milho e feijão. Além disso, o sistema desenvolvido deveria apresentar potencial para implementação em monitores de produtividade de colhedoras tracionadas por tratores. O sistema proposto foi desenvolvido e calibrado no laboratório de mecanização agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Um conjunto de células de carga e um recipiente de volume conhecido foram utilizados para desenvolver um sensor de massa específica aparente. Já o sensor de teor de água foi desenvolvido com base em duas metodologias distintas: método dielétrico e método que utilizava equações de equilíbrio higroscópico. Para construção do sensor com base no método dielétrico foi utilizado um par de eletrodos cilíndricos. O sensor com base na segunda metodologia

foi desenvolvido utilizando as medições realizadas por um sensor de temperatura de umidade relativa do ar modelo AM2302. O sistema desenvolvido processava os dados no microcontrolador Arduino UNO[®], armazenava-os em um cartão de memória e informava ao usuário os valores medidos por meio de um display LCD. Ambos os sensores foram validados utilizando-se grãos de milho e de feijão e tiveram seus respectivos tempos de resposta determinados. O sensor de massa específica aparente apresentou erro quadrático médio (RMSE) de 14,58 e 16,17 kg m⁻³ para os grãos de feijão e de milho, respectivamente. Já as medições teor de água pelo sensor que utilizou o método dielétrico resultou em RMSE de 0,46 e 1,53 %, para os grãos de feijão e de milho, respectivamente. O RMSE pelo método das equações de equilíbrio higroscópico foi de 1,36 %. O tempo de resposta foi de 8 s para o sensor de massa específica aparente; 63 s para o sensor de teor de água pelo método dielétrico; e 41 min para o sensor de teor de água pelo método as equações de equilíbrio higroscópico. Foi construído um equipamento de fácil replicação e atualização, com custo total de construção de R\$ 314,74. O equipamento desenvolvido era condizente com a abordagem de código aberto, na qual o compartilhamento de informações sobre hardware e software de equipamentos facilita a implementação e a melhoria contínua das tecnologias existentes.

ABSTRACT

ARAÚJO, Guilherme de Moura, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2018. **Low Cost System for Determination of Moisture Content and Bulk Density of Bean and Maize.** Advisor: Daniel Marçal de Queiroz. Co-advisors: Domingos Sárvio Magalhães Valente and Pedro Amorim Berbert.

Recent advances in sensor technologies and systems automation have allowed the development of machines and implements for variable rate application and they have enabled the development of precision agriculture. An essential component of precision agriculture is the yield monitor, a system composed of several sensors to measure yield at each point of the field during harvesting. The data measured in the field allow generating yield maps, helping the producer to plan the next crop and to decide which is the best management for the land. In Brazil, only self-propelled harvesters are sold with yield monitors being used only on huge farms, due to their high acquisition cost. One of the most important components of a yield monitor is the moisture content sensor. The bulk density sensor is generally not used in volumetric flow-based machines, the mass flow is determined using a unique test weight value for the entire field. This value is provided by the user of the system, which reduces the accuracy of the determination of yield. Therefore, the objective of this work was to develop a low-cost system capable of determining the bulk density and moisture content for corn and beans. In addition, the developed system should present potential for implementation in yield monitors of harvesters pulled by tractors. The proposed system was developed and calibrated in the agricultural mechanization laboratory of the Federal University of Viçosa. A set of load cells and a container of known volume was used to develop the bulk density sensor. The moisture content sensor was developed based on two different approaches: using the dielectric method and using the equilibrium moisture content equations. For the construction of the sensor based on the dielectric method, a pair of cylindrical electrodes was used. The sensor based on the second methodology was developed using measurements made by an air relative humidity and temperature sensor, model AM2302. The developed system processed the data in the Arduino UNO[®] microcontroller, stored the data in a memory card and informed the user the measured values through an LCD display.

Both sensors were validated using maize and bean grains and had their respective response times determined. The bulk density sensor showed a root mean square error of 14.58 and 16.17 kg m⁻³ for bean and maize grains, respectively. The measurements of moisture content by the sensor using the dielectric method resulted in errors of 0.46 and 1.53 % for beans and maize, respectively. The error by the equilibrium moisture content equation method was 1.36 %. The response time was determined as 8 s for the bulk density sensor; 63 s for the moisture content sensor by the dielectric method; and 41 min for the moisture content sensor by the equilibrium moisture content equations method. It was built an equipment of easy replication and update, with a total development cost of 314.74 BRL (approximately 80.00 USD). The equipment developed was consistent with the open source approach in which sharing hardware and software equipment information facilitates the implementation and continuous improvement of existing technologies.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1	Calibração de sensores para as culturas do feijão e do milho	4
2.2	Automação de tarefas e microcontroladores	6
2.3	Funcionamento de uma célula de carga e suas aplicações	7
2.4	Propriedades dielétricas dos grãos	8
2.5	Equações de equilíbrio higroscópico	10
3	MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1	Desenvolvimento do sistema para medição de massa específica aparente e teor de água nos grãos	14
3.2	Sensor para medição de massa específica aparente	17
3.3	Sensor para medição do teor de água dos grãos	18
3.3.1	Método dielétrico	18
3.3.2	Determinação do teor de água dos grãos a partir da temperatura e umidade relativa do ar intergranular	21
3.4	Testes dos sensores desenvolvidos em laboratório	22
3.4.1	Calibração do Sensor de massa específica aparente	22
3.4.2	Calibração do sensor para medição do teor de água	23
3.4.3	Tempo de resposta dos sensores	24
3.5	Análise estatística dos resultados determinados pelos sensores de medição de massa específica aparente e teor de água	25
3.6	Custo do sistema desenvolvido	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	Sensor de Massa Específica Aparente	28
4.2	Sensor de teor de água dos grãos	31
4.2.1	Determinação do teor de água pelo método dielétrico	31
4.2.2	Determinação do teor de água com base na temperatura e umidade relativa do ar intergranular	36
4.3	Tempo de Resposta dos Sensores	39
4.4	Levantamento do custo de desenvolvimento do sistema	42

5	CONCLUSÕES	44
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa que possui alto conteúdo de amido, proteínas e fibras dietéticas (HOOVER et al., 2010). É um dos alimentos que servem como base da alimentação de grande parte da população mundial, sendo bastante comum sobretudo nos países menos desenvolvidos, que possuem menor arrecadação per capita (DEMIATE et al., 2016). Já o milho (*Zea mays* L.) está entre os cereais mais cultivados e consumidos do mundo, em função do seu potencial produtivo, composição química e valor nutritivo. Possui múltiplas aplicações merecendo destaque o seu uso para alimentação humana e animal.

O cultivo do milho e do feijão geralmente é mecanizado, se beneficiando muito de técnicas modernas de plantio e colheita (PAS & TEETS, 2017). Os recentes avanços das tecnologias de sensores e automação de sistemas tornaram possível o desenvolvimento de máquinas e implementos para aplicação de insumos à taxa variável, e viabilizaram o desenvolvimento das técnicas de agricultura de precisão. A agricultura de precisão é uma forma de gerenciamento agrícola que se baseia nos manejos das variabilidades espacial e temporal dos fatores de produção visando ao aumento do retorno financeiro e à minimização dos impactos ambientais (MAPA, 2013).

Um componente essencial da agricultura de precisão é o monitor de produtividade. Trata-se de um sistema composto por diversos sensores com objetivo de medir a produtividade em cada ponto da lavoura, durante a operação de colheita. Dados de produtividade associados as suas respectivas posições no campo permitem gerar mapas de produtividade. A partir do mapa de produtividade o produtor pode decidir qual o melhor uso/manejo de sua área e qual a alocação ideal de insumos para a safra seguinte (COELHO, 2005).

Independentemente da cultura, os sensores utilizados nos monitores de produtividade são os mesmos. Isto é, medir o fluxo volumétrico ou mássico de grãos, a umidade desses grãos, a velocidade de deslocamento da máquina, a largura da plataforma efetivamente utilizada e a posição geográfica (ZANDONADI et al., 2010). O sensor de umidade dos grãos é utilizado para corrigir a produtividade para um determinado padrão de umidade utilizado na comercialização de grãos. Além disso, em alguns monitores de produtividade para que se torne possível estimar o fluxo mássico dos grãos faz-se necessário a presença de um sensor de massa

específica aparente dos grãos. As informações provenientes deste sensor possibilitam a transformação do fluxo volumétrico em fluxo mássico.

A massa específica aparente é considerada uma das mais simples e tradicionais variáveis para se determinar a qualidade de grãos e sementes. Essa variável é importante no processo de calibração de sensores de umidade (DAVIES et al. 2005). Já o teor de água dos grãos e sementes é um dos fatores determinantes de sua qualidade e é utilizado na comercialização de grãos, pois a partir dele é possível determinar a quantidade de matéria seca.

Devido ao fato de os métodos padrão e de referência para determinação do teor de água em grãos e sementes envolverem procedimentos laboratoriais tediosos e longos períodos de secagem em estufas, surgiram os métodos rápidos com base em sensores (NELSON, 2015). Esses métodos consistem em sistemas baseados em circuitos elétricos capazes de medirem propriedades elétricas ou dielétricas dos produtos agrícolas (CSIBA et al., 2013). O teor de água final do produto é estimado com base nas propriedades medidas dos materiais (NELSON, 2015).

Uma alternativa aos métodos baseados em circuitos elétricos é estimar o teor de água dos grãos por meio de equações de equilíbrio higroscópico (EEH). Essas equações são relações empíricas que associam as condições de temperatura e umidade relativa do ar ao teor de água dos grãos quando o equilíbrio higroscópico entre ar e grão é estabelecido. Contudo, não foi encontrado nenhum trabalho na literatura que comparou o método dielétrico às EEH para estimativa do teor de água dos grãos, tampouco foi verificado se um método apresenta vantagens ao outro, ou ainda, se um deles pode ser utilizado para calibrar o outro.

No Brasil, apenas as máquinas colhedoras autopropelidas são comercializadas com monitores de produtividade sendo empregadas apenas em grandes fazendas, devido ao seu alto custo de aquisição. Dentre os componentes do monitor de produtividade que tornam o sistema oneroso destacam-se o sensor de teor de água dos grãos. O sensor de massa específica aparente geralmente não é utilizado em máquinas com base em fluxo volumétrico, o fluxo mássico é determinado utilizando uma massa específica única para todo o campo fornecida pelo usuário do sistema, o que reduz a exatidão da determinação da produtividade. Neste contexto, torna-se necessário o desenvolvimento de sensores de massa específica aparente e teor de água de baixo custo. Esses sensores podem ser instalados nos monitores de

produtividade para máquinas colhedoras de grãos tracionadas por trator, máquinas essas de menor porte que as colhedoras autopropelidas. A partir destes monitores, a um baixo custo de aquisição e de fácil operação, torna-se possível a difusão da agricultura de precisão para os pequenos produtores de milho e feijão.

Neste sentido, objetivou-se neste trabalho desenvolver um sensor de baixo custo para determinação da massa específica aparente e do teor de água para grãos de milho e de feijão. O teor de água dos grãos foi determinado pelo método dielétrico e pelas EEH. O método que apresentou menores erros e menor tempo de resposta foi adotado para estimar o teor de água dos grãos do sistema proposto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Calibração de sensores para as culturas do feijão e do milho

A precisão dos mapas de produtividade é um importante fator para o sucesso da implementação da agricultura de precisão. Leituras imprecisas nos sensores que compõem o monitor de produtividade causam erros nos mapas de produtividade, o que leva a decisões de gerenciamento incorretas (LOGHAVI et al., 2008). A precisão dos mapas de produtividade é afetada por erros nos dados coletados pelo monitor de produtividade. Esses dados são usados para gerar os mapas, tais como as coordenadas geográficas do aparelho GNSS, fluxo volumétrico dos grãos, massa específica aparente, largura efetiva da plataforma de corte, teor de água dos grãos e dados de entrada informados pelo operador ao sistema (GRISSE et al., 2002).

Um monitor de produtividade é composto por vários sensores, dentre eles o sensor de teor de água dos grãos. A maioria dos erros nos dados de ambos os sensores ocorre quando esses estão descalibrados ou não foram calibrados corretamente. Ainda, podem ocorrer erros porque o sensor está operando fora da faixa para a qual ele foi calibrado, ou até mesmo para uma cultura diferente da qual ele foi calibrado.

Em geral, os sensores apresentam um pequeno atraso para que as leituras se estabeleçam em um valor constante, esse atraso é chamado de tempo de resposta. Não é recomendável utilizar as primeiras medições realizadas por sensores como dados amostrais, pois estes dados podem não retratar a realidade do experimento. O tempo de resposta é uma propriedade importante dos sensores que os caracteriza quanto a sua sensibilidade em detectar mudanças na variável de interesse (LI & CHEN 1996). Estudar o tempo de resposta de um sensor tem grande significância para a teoria e prática experimental (BIKERFIELD et al., 1992). Portanto a calibração dos sensores desenvolvidos também consiste na determinação do tempo de resposta do sensor.

Berbert et al. (2002) estudaram as propriedades dielétricas de sementes de feijão, correlacionando-as à massa específica aparente, ao teor de água e à frequência do campo elétrico aplicado as sementes. A massa específica aparente das amostras variou entre 651 e 854 kg.m⁻³, o teor de água entre 11,5 e 20,6 % e a frequência de excitação do campo elétrico entre 75 kHz e 5 MHz. Foi concluído que todas as variáveis afetaram significativamente as propriedades dielétricas das sementes de

feijão. Também foi concluído que a permissividade relativa (ϵ') é, dentre as propriedades dielétricas do feijão aquela que resulta em menores erros para estimativa do teor de água. Foi reportado R^2 variando entre 0,993 e 0,998 para modelos polinomiais de terceiro grau e 0,972 e 0,987 para modelos lineares. Em estudo posterior, Berbert et al. (2004b) avaliaram três modelos dielétricos para estimativa do teor de água em sementes de feijão em fluxo, e encontraram erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,5 e 1,0 ponto percentual, respectivamente.

Kandala et al. (1989) desenvolveram um método não destrutivo para medir o teor de água em grãos de milho utilizando suas propriedades dielétricas. Os autores trabalharam com grãos na faixa de umidade entre 9,5 e 26 % e frequência de excitação do campo elétrico entre 1 e 4,5 MHz. O erro reportado foi de 1,0 ponto percentual para 91 % das amostras. Mais recentemente, Sacilik & Colak (2010) realizaram estudo semelhante a Berbert et al. (2002) para grãos de milho. Foram utilizados grãos com massa específica aparente variando entre 772,5 e 902,2 kg.m^{-3} ; teor de água entre 9,71 e 21,51 %; e frequência de excitação do campo elétrico entre 1 e 100 MHz. Foram reportados resultados semelhantes aos encontrados por Berbert et al. (2002). O valor de R^2 reportado variou entre 0,980 e 0,998 para modelos polinomiais de terceiro grau e entre 0,978 e 0,992 para modelos polinomiais de segundo grau.

No âmbito comercial existem medidores industriais para determinarem tanto a massa específica aparente quanto o teor de água dos grãos. Em geral, os medidores de massa específica aparente operam todos sob o mesmo princípio, ou seja, eles determinam qual a massa de grãos que ocupam um recipiente com volume conhecido. Os medidores podem ser manuais ou automatizados. Verificou-se que os erros dos medidores industriais de massa específica aparente reportados pelos fabricantes dos medidores Tipo 40, GP939 IP e G1000, fabricados por Dallemole (Caxias do Sul – Brasil), Gehaka (São Paulo, Brasil) e Gehaka, respectivamente, variou entre 0,2 e 0,3 g cm^{-3} . Além disso o preço dos equipamentos variou entre R\$2.690,00; R\$7.400,00 e R\$14.975,00 para os modelos Tipo 40, GP939 IP e G1000, respectivamente. Já os medidores de teor de água operam em sua grande maioria utilizando o método dielétrico, ou seja, determinam o teor de água dos grãos por meio da medição de propriedades dielétricas dos produtos. Os erros reportados pelos fabricantes dos medidores industriais AL-102 ECO, LDS-1G, MC-7828G,

fabricados por AGROLOGIC (Curitiba – Brasil), NEWTRY (Guangdong – China) e LANDTEK (Guangzhou – China) foram de 0,3; 0,5 e 0,5 pontos percentuais, e os preços foram R\$ 2.390,00; R\$1.731,00 e R\$780,00, respectivamente.

2.2 Automação de tarefas e microcontroladores

Desenvolvimentos tecnológicos em hardware e software tornaram possível introduzir a automação em diversos setores da indústria. Isso possibilitou a execução de tarefas simples e complexas dentro de um processo produtivo de maneira mais eficiente, rápida e precisa (PARASURAMAN & RILEY, 1997). A automação é a tecnologia na qual um processo ou procedimento é realizado sem ou com mínima intervenção humana (GROOVER, 2014). A ideia de automação está diretamente ligada à ideia das máquinas, que agilizam as tarefas quase sempre sem a interferência humana (GOLDBERG, 2012).

Seguindo o fluxo dos avanços tecnológicos, o uso de microcontroladores (pequeno computador em um circuito integrado compacto projetado para controlar uma operação específica em um sistema embarcado) surge como uma opção de baixo custo e fácil aplicação para a automação do processo de monitoramento de dados (SANTOS et al., 2018; RAMOS & ANDRADE, 2016). Seu uso em plataformas embarcadas para automatizar processos tem se tornado cada vez mais comum. Microcontroladores são comumente encontrados em veículos, robôs, máquinas de escritório, aparelhos médicos, máquinas de venda, eletrodomésticos, e tratores, dentre outros dispositivos.

Dentre os microcontroladores de prototipagem eletrônica e placa única que tem sido comumente utilizados para automação de tarefas simples o mais popular é o Arduino. Esse microcontrolador possui placa única e um conjunto de software para programá-lo (LEMOS, 2013). O hardware consiste em um projeto simples de hardware livre para o controlador, com um processador Atmel AVR e suporte embutido de entrada/saída. É capaz de executar diversas tarefas que um computador pessoal faria com mesmo desempenho, porém, com custo e tamanho reduzidos. Além disso, pode processar e tomar decisões baseadas em instruções previamente carregadas para o controlador por meio de sua IDE sem a necessidade de estar conectado a um computador externo, o que fornece autonomia para seu sistema.

O Arduino UNO® é uma plataforma de computação física embarcada que manipula tanto sensores analógicos quanto digitais e se conecta a um computador por meio de um cabo USB (BITELLA et al., 2014). A Revisão 3.0 do modelo UNO conta com um microcontrolador ATMEL ATmega328 equipado com 28 portas. Essas portas possuem funções específicas de suprimento de energia (3,3 V e 5 V), entrada e saída digitais, saída digital pulsada (PWM) com resolução de 8 bits e frequência ajustável e entrada analógica com resolução de 10 bits. Também há portas de comunicação com outros dispositivos via USART (*universal synchronous and asynchronous receiver-transmitter – receptor-transmissor síncrono e assíncrono universal*), I²C (inter-integrated circuit – circuito inter-integrado) ou SPI (serial peripheral interface – interface serial periférica).

2.3 Funcionamento de uma célula de carga e suas aplicações

Uma balança possui em sua construção mecânica um conjunto de peças fundamentais para funcionar de maneira adequada e contínua. Um dos itens desse conjunto de componentes é a célula de carga. A célula de carga é um transdutor eletromecânico que é utilizado para criar sinais elétricos, os quais a magnitude é diretamente proporcional a força sendo aplicada sobre célula de carga. Muitas células de carga comercialmente disponíveis são capazes de medir forças e momentos constantes ou dinâmicos que atuam em uma estrutura (BALLO et al., 2014).

O tipo de célula de carga mais comum encontrado no mercado é o tipo “*strain gauge*”. As células de carga deste tipo operam no princípio que o strain gauge se deforma quando uma carga é aplicada sobre ele. Essa deformação altera sua resistência elétrica de maneira proporcional à sua deformação. A mudança na resistência provoca uma mudança no valor do sinal elétrico que é medido por um medidor de tensão, de tal forma que se torna possível determinar a carga sendo aplicada sob o conjunto (SCHMIDT, 2017).

Como a maioria das células de carga são constituídas por metais, elas devem possuir alguma calibração ou mecanismo de compensação térmica, uma vez que os metais possuem a propriedade de se expandirem em resposta ao calor e se contraírem em resposta ao frio. Por isso é importante se monitorar as condições de temperatura ambiente na hora em que as medições de peso são realizadas.

A necessidade de se medir o peso de uma determinada carga é uma atividade recorrente em diversas indústrias, tais como: Indústria aeroespacial, automotiva, manufatureira, de automação, produção de ferramentas e materiais, farmacêutica, equipamentos médicos e laboratoriais, robótica e agrícola (JAKOVLJEVIC et al., 2012; CHEN et al., 2011; BLAKEBOROUGH et al., 2002). Em especial, destaca-se na indústria agrícola o uso de células de carga em unidades armazenadoras, tratores e máquinas colhedoras de grãos. Em monitores de produtividade a célula de carga é utilizada na placa de impacto do sensor de fluxo de grãos. Este sensor possui a função de estimar o fluxo de massa dos grãos colhidos. Entretanto, existem sensores de fluxo que utilizam tecnologia óptica, neste caso o sensor estima o fluxo volumétrico dos grãos, e não o fluxo mássico. Para transformar o fluxo volumétrico em fluxo mássico é utilizado um sensor de massa específica aparente, que, dentre outros componentes, possui uma célula de carga.

2.4 Propriedades dielétricas dos grãos

Os materiais dielétricos são uma classe de materiais que são maus condutores de eletricidade, ao contrário dos metais, que geralmente são condutores elétricos bastante eficientes. Dentre os diversos materiais dielétricos destacam-se a maioria dos produtos agrícolas. A natureza elétrica desses materiais pode ser descrita por suas propriedades dielétricas, que influenciam na distribuição dos campos eletromagnéticos e correntes existentes na região ocupada por estes materiais, e determinam o comportamento dos materiais em campos elétricos (NELSON, 2010). Dessa forma, ao analisar-se as propriedades dielétricas de um determinado material torna-se possível detectar outras propriedades deste material, que podem ser correlacionadas com as propriedades dielétricas analisadas.

As propriedades dielétricas de materiais agrícolas e produtos alimentícios são um parâmetro chave que determina como eles interagem com um campo eletromagnético. Seu estudo é de grande importância em várias áreas da ciência e engenharia, tanto em pesquisa teórica quanto aplicada (BARTLEY et al., 2002). Na agricultura, as propriedades dielétricas dos grãos têm sido amplamente utilizadas para determinar o teor de água dos grãos, devido à sua utilidade para a detecção rápida de umidade. A detecção do teor de água depende de correlações entre as

propriedades dielétricas dos grãos e a quantidade de água presente neles (WILD & HAEDICK, 2005).

A maioria dos aparelhos comerciais capazes de medirem o teor de água dos grãos são baseados na medição da capacitância, a qual se altera de acordo com o teor de água dos grãos (NELSON, 1973). A constante dielétrica de um material é uma medição da habilidade do mesmo em armazenar carga elétrica. Numericamente, a constante dielétrica é a razão entre a capacitância do material e a capacitância quando o espaço livre é o meio dielétrico (ZOERB et al., 1993). As propriedades dielétricas dos grãos são proporcionais à massa de água na amostra, porque a constante dielétrica da água é de cerca de 80, enquanto a da matéria seca é inferior a 3. Assim, é relativamente fácil detectar a massa de água dentro de uma amostra de grãos usando propriedades dielétricas (LAWRENCE et al., 1998).

Uma das formas mais simples de se estimar a capacitância de determinado material é através de um circuito resistivo-capacitivo (RC). Em circuitos RC, o capacitor é carregado em um tempo característico τ (Figura 1), sendo esta função da voltagem inicial do circuito (V_0), da capacitância (C) do capacitor e da resistência (R) do circuito (KNIGHT, 2008).

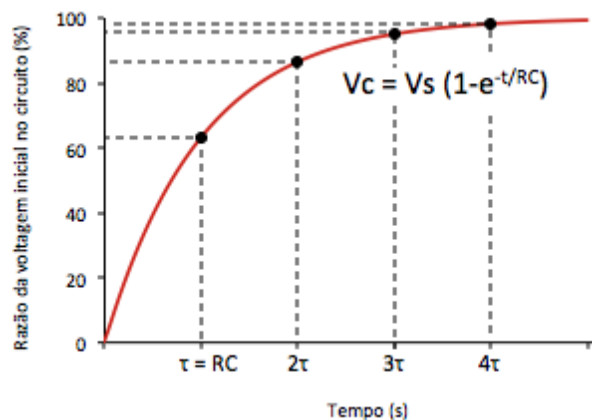


Figura 1 – Diferença de potencial em um capacitor durante seu carregamento

A diferença de potencial entre as placas do capacitor é de aproximadamente 63,2 % da voltagem inicial (V_0) quando o tempo de carga é equivalente ao valor de R vezes o valor de C (Figura 1). Um timer pode ser utilizado para calcular o tempo necessário para que a diferença de potencial no capacitor seja igual a 63,2 % da voltagem inicial. Portanto, é possível estimar a capacitância do material dielétrico

quando a resistência do circuito, o tempo de carga do capacitor e a voltagem inicial são valores conhecidos.

O teor de água dos grãos possui grande influência na constante dielétrica dos produtos agrícolas, entretanto ele não é o único fator que possui essa propriedade. Nelson (1982) e Berbert et al. (2002) estudaram o efeito da influência de diversos fatores na constante dielétrica de produtos agrícolas, concluindo que o teor de água, a massa específica aparente e a temperatura do produto são os fatores com maior impacto no valor da constante dielétrica de grãos e sementes. Além disso, os autores reportam que a relação entre a constante dielétrica dos produtos e sua massa específica aparente não é linear para um teor de água constante. Mathews (1963) e Rasmussen & Anderson (1949) relataram uma correlação linear entre a constante dielétrica dos grãos e alterações na temperatura da massa de produto. Portanto, ao estimar-se a constante dielétrica de produtos agrícolas é fundamental que se tome dados referentes à massa específica aparente do produto e a temperatura da massa de grãos/sementes.

2.5 Equações de equilíbrio higroscópico

Teores de água acima do ideal para a armazenagem e o aumento de temperatura na massa de produtos armazenados fazem aumentar a atividade respiratória dos grãos e da microflora presente na massa de grãos (BROOKER et al., 1992). Saul e Steele (1966) estudaram os efeitos do teor de água do produto, da temperatura e dos danos mecânicos na deterioração de grãos de milho. Um modelo para estimar a perda de matéria seca de grãos de milho em função do teor de água, da temperatura e da porcentagem de grãos com danos mecânicos foi proposto e validado, comprovando a relação entre os fatores citados e a deterioração dos grãos.

Para calcular o teor de água de equilíbrio (U_e) dos grãos existem diversas equações que relacionam a umidade relativa do ar ambiente (URA) com a umidade de equilíbrio, entretanto, nenhuma equação é capaz de descrever com precisão a relação U_e/URA para uma grande variedade de grãos, e grandes intervalos de temperatura e umidade relativa do ar (VAN DEN BERG & BRUIN, 1981). Portanto, para um determinado cenário específico é necessário um estudo minucioso acerca de qual equação realiza a melhor descrição do processo de equilíbrio higroscópico entre ar e grão. Neste sentido, foram investigados diferentes modelos propostos na

literatura com o propósito de identificar aquele que melhor pode ser utilizado em um sistema para determinação do teor de água dos grãos.

As equações mais utilizadas para estimar a umidade de equilíbrio (U_e) são as equações modificadas de: Henderson, Chung-Pfost, Halsey e Oswin (GELY & PAGANO 2012); apresentadas nas Equações (1), (2), (3) e (4), respectivamente. A Tabela 1 mostra os valores dos parâmetros dessas equações para diversos produtos.

$$U_e = \left[\frac{\ln(1 - \phi)}{-A_{He}(T + B_{He})} \right]^{C_{He}} \quad (1)$$

$$U_e = -\frac{1}{B_C} \left[\ln \left(\frac{-T + C_C}{A_C \cdot \ln(\phi)} \right) \right] \quad (2)$$

$$U_e = \left(\frac{-e^{A_{Ha} + B_{Ha} \cdot T}}{\ln(\phi)} \right)^{C_{Ha}} \quad (3)$$

$$U_e = (A_O + B_O \cdot T) \cdot \left(\frac{1 - \phi}{\phi} \right)^{C_O} \quad (4)$$

Em que,

U_e : Umidade de equilíbrio (%), b.s.;

ϕ : Umidade relativa do ar (decimal);

T: Temperatura do ar ambiente (°C);

A_{He} , B_{He} e C_{He} : Parâmetros da equação modificada de Henderson, para diversos produtos (adimensional);

A_C , B_C e C_C : Parâmetros da equação modificada de Chung-Pfost, para diversos produtos (adimensional);

A_{Ha} , B_{Ha} e C_{Ha} : Parâmetros da equação modificada de Halsey, para diversos produtos (adimensional);

A_O , B_O e C_O : Parâmetros da equação modificada de Oswin, para diversos produtos (adimensional).

Tabela 1 – Parâmetros das Equações modificadas de Henderson (Equação 1), de Chung-Pfost (Equação 2), de Halsey (Equação 3) e de Oswin (Equação 4) para diversos produtos.

Produto	Equação	Parâmetros			Fonte
		A	B	C	
Milho	1	$9,557 \times 10^{-5}$	1,854	44,213	Gustafson & Hall (1974)
Milho	2	475,120	0,148	71,996	Chen & Morey (1989)
Milho	3	5,539	-0,017	2,194	Chen (1988)
Milho	4	13,474	-0,062	3,429	Chen & Morey (1989)
Amendoim (grãos)	1	$65,041 \times 10^{-5}$	50,561	1,498	Fioreze (1982)
Amendoim (grãos)	2	254,980	29,243	33,892	Navarro & Noyes (2002)
Amendoim (grãos)	3	3,992	$-1,786 \times 10^{-2}$	2,237	Chen & Morey (1989)
Amendoim (grãos)	4	6,981	$-4,387 \times 10^{-2}$	3,702	Chen & Morey (1989)
Trigo	1	$2,301 \times 10^{-5}$	55,815	2,286	Fioreze (1982)
Trigo	2	529,450	17,609	50,998	Navarro & Noyes (2002)
Trigo	4	14,736	$-5,459 \times 10^{-2}$	3,336	Chen & Morey (1989)
Feijão	1	$3,596 \times 10^{-5}$	193,091	1,764	Fioreze (1982)
Feijão	2	671,780	14,964	120,098	Navarro & Noyes (2002)
Feijão	3	4,270	$-1,33 \times 10^{-2}$	1,693	Chen & Morey (1989)

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Projeto de Máquinas e Visão Artificial I (PROVISAGRO I) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizado nas coordenadas geodésicas 20°45'14" latitude S e 42°52'55" longitude W, com altitude média de 648 m.

Os sensores para medição da massa específica aparente (MEA) e do teor de água nos grãos (TAG) foram desenvolvidos utilizando como controlador o computador de placa única e fonte aberta Arduino UNO[®], revisão 3.0, com software (IDE) versão 1.8.5. O Arduino utilizado possuía um microcontrolador ATMEL ATmega328 equipado com 28 portas. Essas portas possuíam funções específicas de suprimento de energia (3,3 e 5,0 V), entrada e saída digitais, saída digital pulsada (PWM) com resolução de 8 bits e frequência ajustável e entrada analógica com resolução de 10 bits, além de portas de comunicação com outros dispositivos via USART (*Universal Synchronous and Asynchronous Receiver-Transmitter – receptor-transmissor síncrono e assíncrono universal*), I²C (*Inter-integrated Circuit – circuito inter-integrado*) ou SPI (*Serial Peripheral Interface – interface serial periférica*).

A programação das rotinas executadas no microcontrolador foi realizada por meio do ambiente de desenvolvimento multi-plataforma (IDE) do Arduino, na linguagem C++. Um diagrama esquemático da rotina executada no microcontrolador para medir as variáveis de interesse é apresentado na Figura 2. O controlador e os circuitos eletrônicos auxiliares foram instalados em um compartimento fechado instalado na lateral da base do sensor. Este compartimento possui proteção contra poeira e umidade.

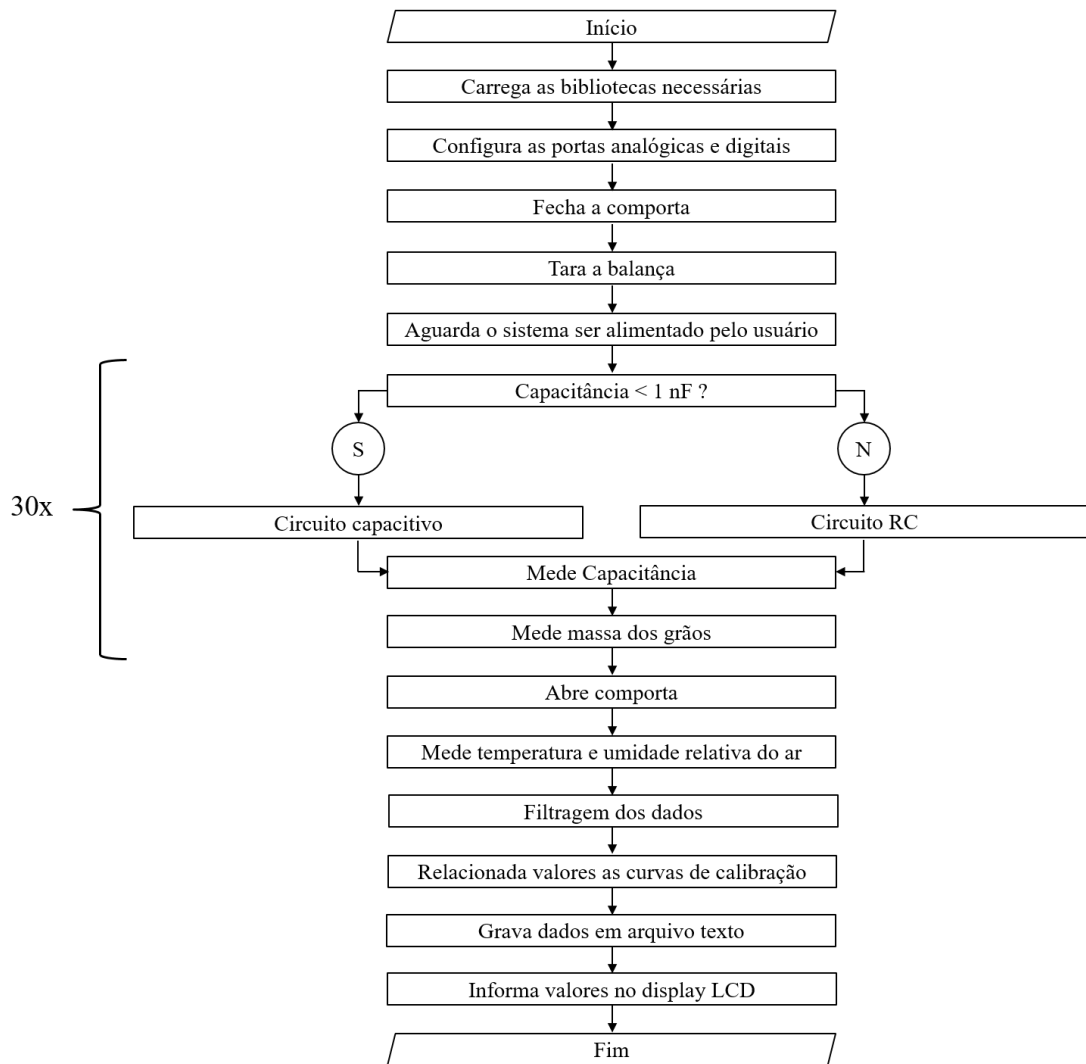


Figura 2 – Diagrama de funcionamento da rotina executada no microcontrolador.

3.1 Desenvolvimento do sistema para medição de massa específica aparente e teor de água nos grãos

Os sensores desenvolvidos compuseram um sistema de bancada (Figura 3) com potencial para adaptação e instalação em monitores de produtividade. Ao ser alimentado por grãos, o sistema estimava a massa específica aparente e o teor de água destes, e posteriormente os liberava. Esse sistema foi constituído por um conjunto de quatro células de carga com um amplificador de sinal para estimativa da massa específica aparente e um par de cilindros para estimativa do teor de água.

O sistema foi equipado com um módulo SD Card integrado a um cartão de memória com capacidade de armazenamento de 8 GB, para que fosse possível realizar medições contínuas sem pausas para anotar os resultados. A base de

sustentação do sistema foi constituída por uma caixa metálica, uma placa de madeira, uma comporta com mecanismo de quatro barras. Os circuitos elétricos do sistema foram armazenados em um compartimento fechado, instalado na lateral da base do sistema (Figura 2). Um display LCD 16x2, modelo RT162-7 (SHEZEN RUIDE ELECTRONIC CO., LTD, Shenzhen - China), foi instalado no compartimento que armazenava os circuitos elétricos para facilitar a comunicação do sistema com o usuário (Figura 2).

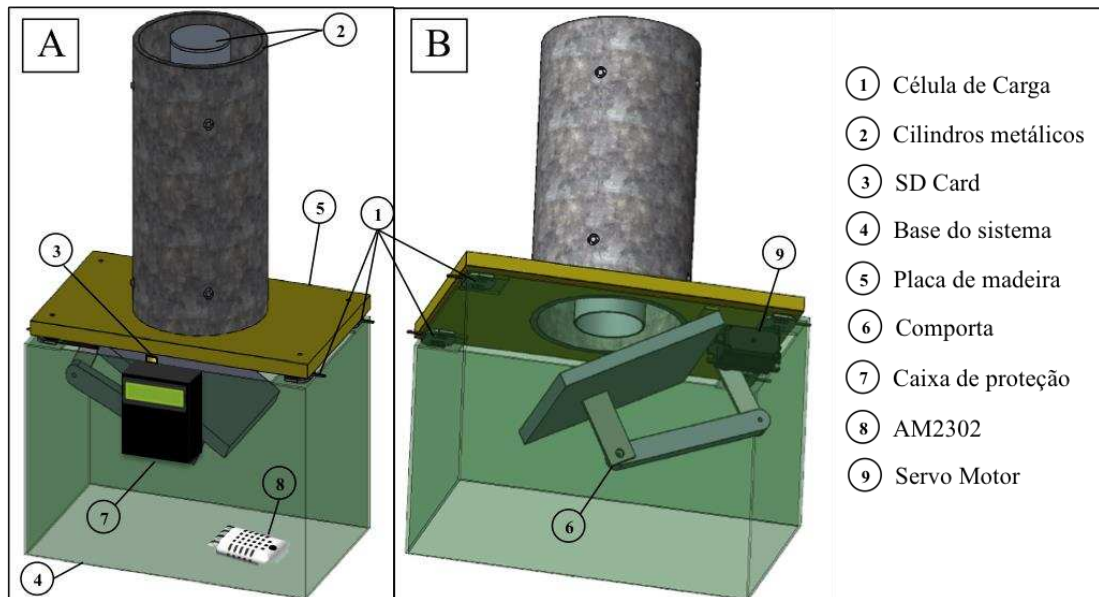


Figura 3 – Vista superior (a) e inferior (b) em perspectiva do sistema proposto.

O cilindro interno possuía uma de suas extremidades fechada por uma tampa, que tinha como função bloquear a passagem dos grãos por seu interior. Os grãos foram inseridos no sistema pela extremidade superior, com auxílio de um funil posicionado de maneira concêntrica ao cilindro interno (Figura 3). Ao saírem do funil os grãos atingiram a tampa do cilindro interno (Figura 4a), o que garantiu que fossem alocados de maneira aleatória entre os cilindros (recipiente de volume conhecido), sendo encerrada quando o espaço entre ambos estava completamente cheio. Posteriormente, com uma régua foi removido o excesso de grãos da superfície do sistema, de tal forma a mantê-la nivelada com topo de ambos os cilindros (Figura 4b).

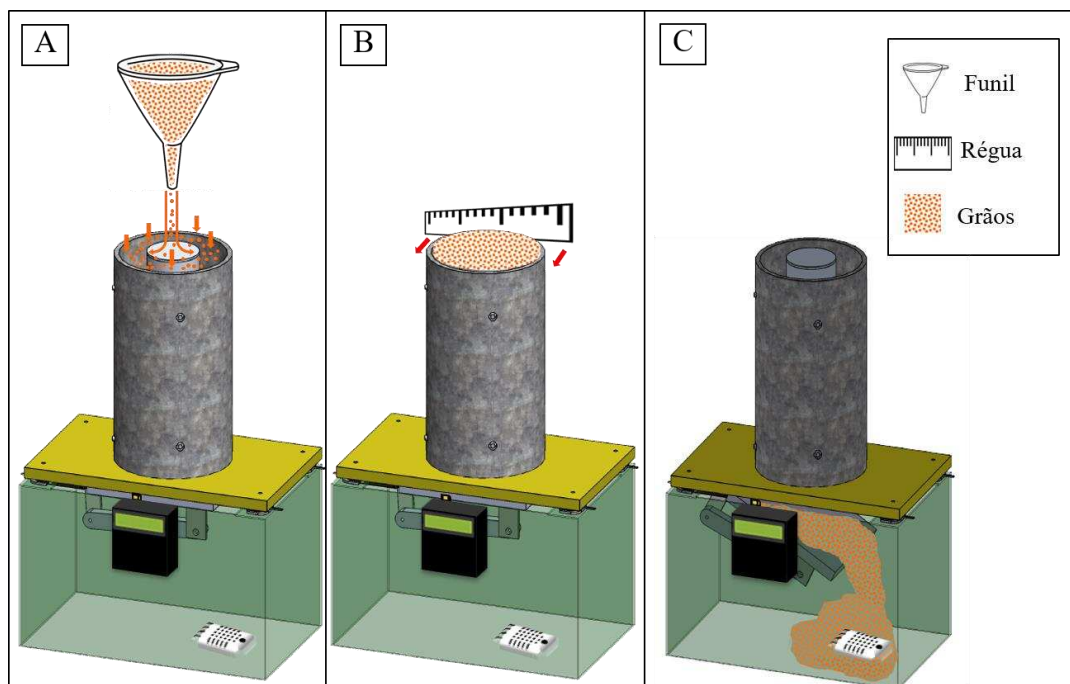


Figura 4 – Inserção de grãos no sensor (a) remoção do excesso destes (b) e grãos em contato com o sensor de temperatura e umidade relativa do ar (c).

No interior da base do protótipo foi instalado um sensor para medição da temperatura e umidade relativa do ar intergranular, para posterior correção dos dados de teor de água dos grãos (Figura 4c). O sensor utilizado foi do modelo AM2302[®] (fabricante AOSONG ELECTRONICS COMPANY, Guangzhou – China), que operava com voltagem de alimentação de 3,3 ou 5,0 V (compatível com o Arduino) e precisão de $\pm 0,5$ °C e ± 2 % (temperatura ambiente e umidade relativa do ar, respectivamente). O mesmo foi calibrado, tomando como referência, as leituras de temperatura aferidas por um termômetro de mercúrio padrão, modelo 1061 (fabricante ARBA AMARELL TERMÔMETROS DO BRASIL LTDA, Porto Alegre – Brasil). O aparelho adotado como referência possui precisão de $\pm 0,1$ °C conforme informado nas especificações técnicas do equipamento.

A comporta que permitia a passagem de grãos pelo sistema era acionada por um par de manivelas controladas por um servo motor modelo MG996R (fabricante TOWERPRO – SINGAPURA). O servo motor operava com tensão de entrada entre 4,8 e 7,2 V, possui torque máximo igual a 0,92 N m (9,40 kg cm) e é capaz de girar entre 0 e 180 °. Além disso possui velocidade de giro igual a 353 ° s⁻¹, ciclo de pulso igual a 1 ms e massa igual a 55 g.

3.2 Sensor para medição de massa específica aparente

O sensor para medição de massa específica aparente foi constituído por um conjunto de quatro células de carga, um amplificador de sinal (Figura 5) e o recipiente definido pelo volume existente entre ambos os cilindros concêntricos. A adoção do número exato de quatro células de carga se deu de forma a criar um circuito elétrico constituído por uma ponte completa de Wheatstone. Dentre as vantagens da utilização desta configuração destaca-se sua capacidade de fornecer medições extremamente precisas, ao invés de atuar como um simples divisor de tensão (GRIFFIN, 2014). As células de carga eram do modelo YZC-161 (fabricante BQLRZ[®], Shenzhen – China), possuíam dimensões de 28 x 28 mm e apresentaram capacidade máxima de leitura de até 10,0 kg. Operaram com tensão de entrada entre 5,0 e 10,0 V numa faixa de temperatura entre -10 e 50 °C. De acordo com o *datasheet* do aparelho, apresentam erro de 0,2 % e histerese de 0,2 %. O amplificador de sinal foi o módulo HX711 (SPARKFUN[®], Niwot – Estados Unidos).

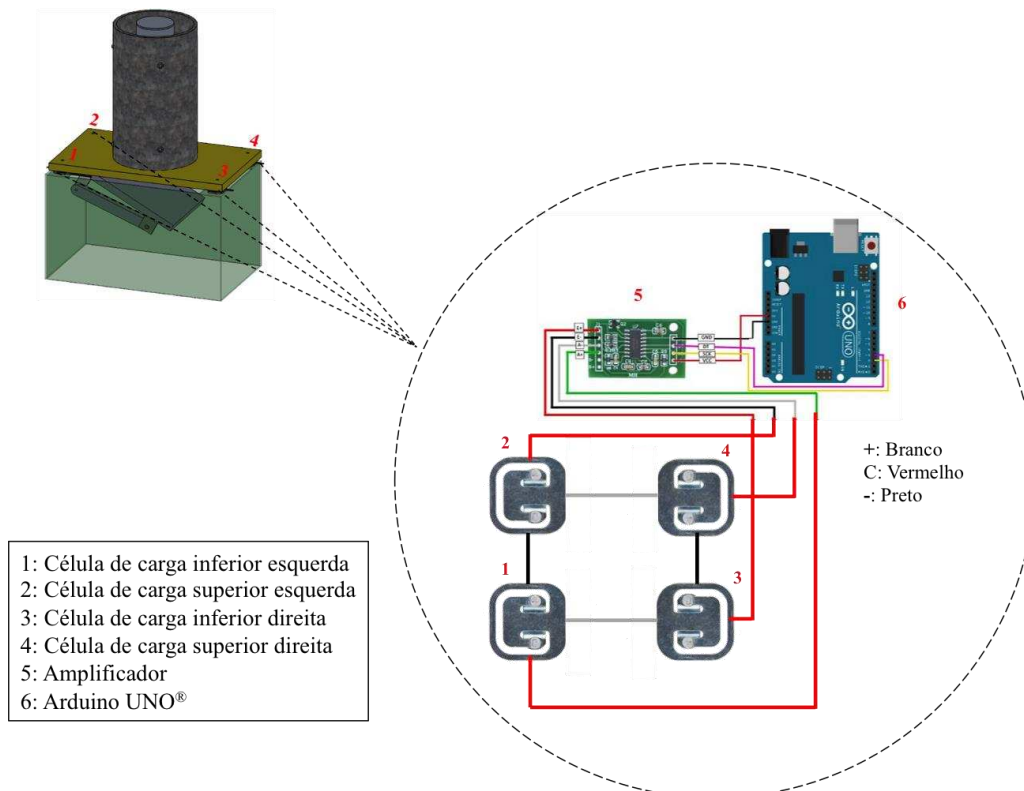


Figura 5 – Células de carga YZC-161 e módulo HX711, utilizados para medir a massa de grãos no sistema.

A comporta abria e fechava em função do comando enviado pelo microcontrolador ao servo motor (conforme item 3.1). Quando o volume entre os cilindros se encontrava cheio de grãos a comporta permanecia fechada. O microcontrolador então acionava o conjunto de células de carga por meio de uma de suas portas de comunicação analógica e realizava 30 leituras referente à massa da coluna de grãos sob a comporta. Então, o microcontrolador acionava o servo motor para abrir a comporta e permitir a saída dos grãos. Após um intervalo de tempo de 10 segundos o controlador realizava uma leitura da temperatura e umidade relativa do ar intergranular. Por fim, todas as medições eram armazenadas num arquivo txt que era salvo no cartão de memória e, posteriormente eram informadas no display LCD.

3.3 Sensor para medição do teor de água dos grãos

3.3.1 Método dielétrico

O sensor para medição do teor de água foi constituído por dois eletrodos formando as placas de um capacitor cilíndrico. O eletrodo interno possuía um diâmetro de 50 ± 1 mm e o eletrodo externo 106 ± 1 mm e comprimento de 200 ± 1 mm. Os eletrodos foram montados verticalmente sob a placa de madeira e conectados por quatro hastes que atravessam ambos em quatro diferentes pontos, formando duas “cruzes”. Isso garantiu que os eletrodos estivessem dispostos de forma concêntrica e não possuísem nenhum grau de liberdade para se movimentarem durante a realização das medições.

Para estimar as propriedades dielétricas das amostras foram utilizados dois circuitos elétricos distintos, um circuito puramente capacitivo e um circuito resistivo capacitivo (RC), ambos de corrente contínua, propostos por NETHERCORTT (2014) (Figura 6).

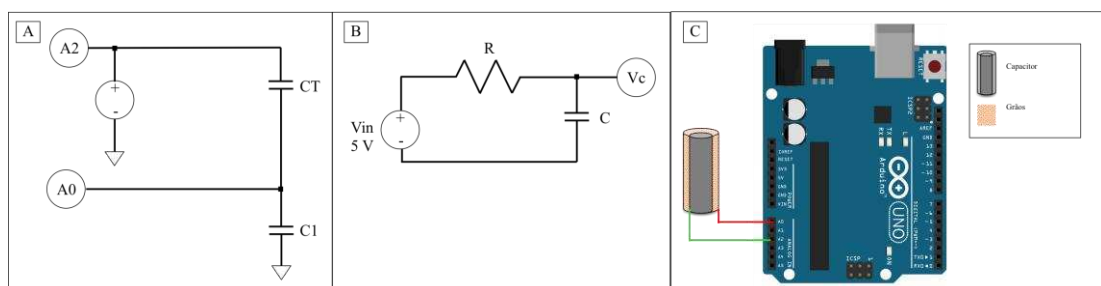


Figura 6 – Circuito elétrico utilizado para medir capacitâncias inferiores a 1 nF (a), superiores a 1 nF (b) e circuito implementado no microcontrolador.

O circuito puramente capacitivo (Figura 6a) apresenta maior precisão para determinar a capacitância de pequenos capacitores, ou seja, capacitores cuja capacitância é inferior a 1 nF. Já o circuito RC (Figura 6b) apresenta melhor precisão para capacitores cuja capacitância é superior a 1 nF (NETHERCORTT, 2014). Contudo, é importante ressaltar que os capacitores são capazes de medir valores de capacitância em todo o intervalo de 18 pF a 470 µF. A escolha de um circuito em relação ao outro se deve apenas em função da acurácia obtida por cada um deles para intervalos específicos de valores de capacitância.

A capacitância dos capacitores medida pelo circuito puramente capacitivo é determinada por meio da Equação 5. Já a capacitância medida pelo circuito RC é determinada pela Equação 6.

$$C_T = \frac{V_{A0} \times C_1}{V_{A2} - V_{A0}} \quad (5)$$

Em que,

C_T – Capacitância do capacitor com grãos (Farad);

V_{A0} – Voltagem na porta analógica A0;

C_1 – Stray capacitance do microcontrolador Arduino UNO® (F);

V_{A2} – Voltagem na porta analógica A2.

A capacitância do circuito descrito na Figura 5a foi determinada por meio da Lei das Malhas (2ª Lei de Kirchhof). A porta analógica A2 foi configurada para sempre enviar uma voltagem igual a 5,0 V para o circuito. Stray Capacitance é um valor inevitável e indesejado de capacitância que existe entre as partes de um componente ou circuito elétrico devido à proximidade de componentes entre si. Para eliminar esse ruído das medições aferidas pelo sensor foram realizados testes prévios com capacitores cuja capacitância era conhecida. A partir dos valores de capacitância conhecida foi possível determinar a stray capacitance do controlador e excluir seu valor das medições realizadas posteriormente.

$$C_T = \frac{-TC}{R \ln\left(1 - \frac{V_c(t)}{V_{in}}\right)} \quad (6)$$

Em que,

TC – Tempo característico (s);

R – Resistência (Ω);

$V_c(t)$ – Voltagem em função do tempo medida na porta analógica;

V_{in} – Voltagem inicial enviada ao circuito.

A capacitância do circuito descrito na Figura 5b foi determinada por meio da equação de carga/descarga de capacitores alimentados por corrente contínua. Enquanto o capacitor era carregado a porta analógica A0 enviava um sinal de 5,0 V para o circuito e a porta analógica A2 era responsável por medir a voltagem em função do tempo (V_c). Por meio do “clock” interno do microcontrolador foi possível medir os valores de tempo respectivos a cada valor de voltagem registrada na porta A2. Quando o capacitor estava totalmente carregado as portas A0 e A2 tiveram suas respectivas funções invertidas, de modo a proporcionar o descarregamento do capacitor. A resistência (R) utilizada para compor o circuito foi a resistência interna (PULLUP) do microcontrolador. Seu valor foi determinado utilizando-se um capacitor cujo valor de capacitância era conhecido.

Contudo, os valores de capacitância por si só não são ideais para se estabelecer relações entre o teor de água dos materiais e suas propriedades dielétricas. A capacitância também é influenciada pela geometria dos eletrodos que compõe o capacitor. Já a constante dielétrica é uma variável que depende apenas das propriedades das amostras avaliadas, e por essa razão seu uso é mais comum na literatura (BANSAL et al., 2015; SACILIK & COLAK, 2010). Assim, a constante dielétrica de um material para o capacitor cilíndrico foi determinada utilizando a Equação (7).

$$\epsilon' = \frac{C \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi L \epsilon_0} \quad (7)$$

Em que,

ϵ' – Constante dielétrica do material (adimensional);

a – Raio do eletrodo interno (m);

b – Raio do eletrodo externo (m);

L – Comprimento dos eletrodos (m);

ϵ_0 – Permissividade do espaço livre ($8,854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$).

3.3.2 Determinação do teor de água dos grãos a partir da temperatura e umidade relativa do ar intergranular

O sensor para medição do teor de água baseado nas equações de equilíbrio higroscópico (EEH) utilizou as medições de temperatura e umidade relativa do ar aferidas pelo sensor AM2302[®] (fabricante AOSONG ELECTRONICS COMPANY, Guangzhou - China) para estimar o teor de água nos grãos. Esse sensor possui boa precisão e alta resolução (SHAKER & IMRAN, 2013). Além disso, é capaz de transmitir dados a uma distância superior a 20 m (GANG et al., 2013). Scarpa et al. (2017) e Martín-Garín et al. (2018) recomendam a utilização do AM2302 para monitorar condições de temperatura ambiente e umidade relativa do ar em usos diversos.

O sensor AM2302 foi inserido no interior da base do protótipo (Figura 7) e realizava medições de temperatura e umidade relativa do ar intergranular, logo após os grãos terem sua massa determinada e serem liberados pelo sistema. Foi desenvolvido um código em linguagem C++ responsável por controlar o acionamento do sensor e informar ao usuário os valores lidos por meio de um display LCD. Todas as medições foram armazenadas num arquivo texto que foi transferido para um cartão de memória.

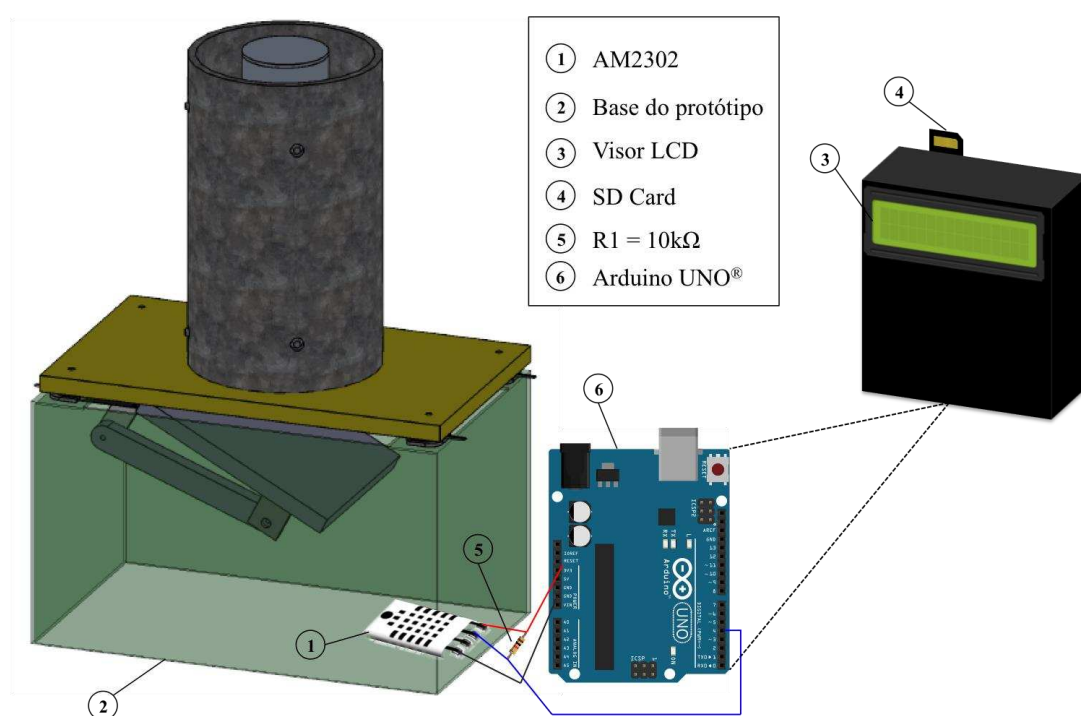


Figura 7 – Circuito do sensor AM2302 para estimar o teor de água dos grãos.

3.4 Testes dos sensores desenvolvidos em laboratório

Os testes dos sensores desenvolvidos foram realizados no Laboratório de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Foram criadas rotinas específicas para os testes dos sensores por meio do IDE (Ambiente de desenvolvimento integrado) do microcontrolador, as quais foram responsáveis pela aquisição, apresentação e armazenamento de dados.

3.4.1 Calibração do Sensor de massa específica aparente

Para calibrar o sensor de massa específica aparente foram utilizados materiais (pélete de ração animal, frutos de café verde, amendoim em grãos, grãos de milho e de feijão) com diferentes valores de massa específica aparente. As massas específicas desses materiais foram determinadas utilizando uma balança de peso hectolítrico de 250 ml (COSTA et al., 2009), modelo Tipo 40 (fabricante DALLEMOLLE, Caxias do Sul – BRASIL), nº de série 9266 (Figura 8).

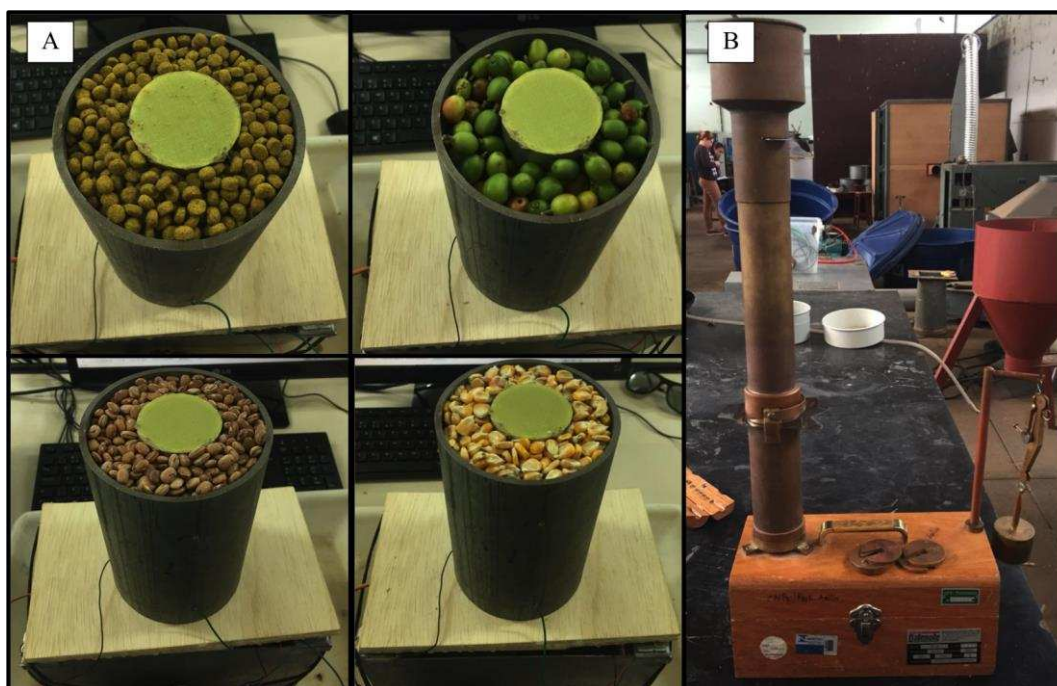


Figura 8 – Materiais utilizados para calibrar o sensor de massa específica aparente (a) e balança de peso hectolítrico utilizada (b).

A balança de peso hectolítrico utilizada operava com uma carga máxima de 250,0 g e possuía erro de 0,25 g. Os produtos utilizados tiveram sua massa específica aparente determinada pelo sensor desenvolvido. Após uma filtragem de dados em

função dos valores médios obtidos e dos valores reais de referência, foi ajustada por regressão uma equação de calibração para o sensor desenvolvido.

$$\varphi = a + bV \quad (8)$$

Em que,

φ – Massa específica aparente dos grãos (kg.m^{-3});

a e b – Parâmetros da equação de calibração;

V – Valor lido pelo sensor (V).

3.4.2 Calibração do sensor para medição do teor de água

Determinador pelo método dielétrico

Foram utilizados grãos de feijão e de milho com valores iniciais de teor de água próximos a 20 e 30 %, b.u., respectivamente. Inicialmente, o teor de água dos grãos foi determinado pelo sensor de estimativa do teor de água pelo método dielétrico. Posteriormente, o teor de água dos grãos foi determinado pelo método padrão da estufa (103 ± 1 °C por 72 h), descrito pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologias norte americano (NIST, 2017).

Os grãos foram secos a temperatura ambiente até atingirem o teor de água final de 9,4 % b.u., em reduções de aproximadamente 1,0 %. A cada redução os grãos tiveram seu teor de água determinados pelo sensor de estimativa do teor de água pelo método dielétrico e determinados pelo método padrão da estufa. Para calibração do sensor foram realizadas sete medições para cada tipo de grão e para validação foram realizadas quatro medições. A faixa de calibração do feijão variou entre 9,4 e 20 % e a faixa de calibração do milho entre 9,4 e 30 %.

Após a filtragem de dados em função dos valores médios obtidos e dos valores reais de referência, foi ajustada uma curva de calibração para o sensor de teor de água por regressão apresentada na Equação (9).

$$U = a + b. \varepsilon' + c. \varepsilon'^2 + d. \varepsilon'^3 + e. \ln(f. \varepsilon') \quad (9)$$

Em que,

U – Teor de água dos grãos (% b.u.);

a, b, c, d, e, f – Parâmetros da equação de calibração;

A equação matemática genérica adotada para calibrar o sensor de teor de água engloba os modelos polinomiais de primeiro, segundo e terceiro grau, além do logaritmo natural. Esses foram os modelos mais comumente encontrados na literatura revisada que relacionam os valores de constante dielétrica dos produtos agrícolas aos seus respectivos teores de água (Berbert et al., 2002; Berbert et al., 2004a; Moura et al., 2013).

Determinador do teor de água com base na temperatura e umidade relativa do ar intergranular

Foram utilizadas amostras de grãos de milho com teores iniciais de água próximos a 30 %. Para se obter amostras com menores teores de água, parte do produto foi submetida à secagem com ar ambiente. Os teores de água dos grãos foram estimados pelas equações (1) a (4), utilizando-se valores de temperatura e umidade relativa do ar intergranular determinados pelo sensor AM2302. Esses valores de teor de água foram comparados aos valores determinados pelo método padrão.

3.4.3 Tempo de resposta dos sensores

Para obter o tempo de resposta dos sensores desenvolvidos, para determinarem a massa específica aparente, o teor de água pelo método dielétrico, o teor de água pela equação de umidade de equilíbrio, foram conduzidos quatro experimentos em Delineamento em Blocos Casualizados (DBC). A variável de controle utilizada foi o tipo de grão (feijão e milho). Para cada experimento foram utilizadas três repetições.

No experimento que visou determinar o tempo de resposta do sensor para medição da massa específica aparente (MEA) dos grãos foram adotados os seguintes tratamentos:

- i) Pélete de ração animal (MEA = 405,0 kg.m⁻³);
- ii) Frutos verdes de café arábica (MEA = 556,0 kg.m⁻³);
- iii) Amendoim em grãos (MEA = 602,0 kg.m⁻³);
- iv) Grãos de milho (MEA = 683,3 kg.m⁻³);
- v) Grãos de feijão (MEA = 802,7 kg.m⁻³).

No experimento para determinar o tempo de resposta do sensor para medição do teor de água (TA) pelos métodos dielétricos e de umidade de equilíbrio foram adotados os seguintes tratamentos:

- i) Grãos de feijão (TA = 20,2 %);
- ii) Grãos de feijão (TA = 14,5 %);
- iii) Grãos de feijão (TA = 9,4 %);
- iv) Grão de milho (TA = 28,9 %);
- v) Grão de milho (TA = 17,9 %); e
- vi) Grãos de milho (TA = 11,8 %).

Os grãos foram deixados em contato com o sensor AM2302 dentro de um recipiente plástico hermeticamente fechado com espessura de 0,20 micrômetros, para manter o teor de água da massa de grãos constante em atmosfera controlada. Para tal controle foi usado a câmara de incubação BOD modelo 347 CD (FANEM®, Guarulhos - BRASIL).

No experimento para determinar o tempo de resposta do sensor para medição da variável temperatura, foram adotados os seguintes tratamentos:

- i) Temperatura intergranular igual a -1,0 °C;
- ii) Temperatura intergranular igual a 10,0 °C;
- iii) Temperatura intergranular igual a 20,0 °C
- iv) Temperatura intergranular igual a 25,0 °C;
- v) Temperatura intergranular igual a 30,0 °C; e
- vi) Temperatura intergranular igual a 45,0 °C.

As leituras do sensor para todos os experimentos foram armazenadas em um arquivo texto, que foi transferido para o cartão de memória. Foi considerado como o tempo de resposta dos sensores, o momento exato em que as leituras efetuadas permaneceram constantes.

3.5 Análise estatística dos resultados determinados pelos sensores de medição de massa específica aparente e teor de água

Foram realizadas análises estatísticas descritivas e inferenciais para se avaliar as curvas de calibração dos sensores e selecionar a equação que apresentou melhores estimativas do teor de água por meio das equações de umidade de equilíbrio. A validação da calibração dos sensores e seus respectivos tempos de resposta também

foram avaliados. Foi empregado o *software*, versão R 3.3.3 (R Foundation for Statistical Computing, Viena – Áustria) para realizar todas as análises estatísticas citadas.

Curvas de Calibração

O ajuste das curvas de calibração foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2), pela raiz do erro quadrático médio (RMSE) (HONG et al., 2017; HALDER et al., 2017), pelo erro-padrão da estimativa (SE) (CHEN & MOREY, 1989) e pela significância dos coeficientes dos modelos gerados. A significância dos coeficientes foi avaliada por meio do teste t, ao nível de 5 % de significância. A raiz do erro quadrático médio e o erro-padrão da estimativa foram calculados pelas Equações (10) e (11).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(V_{med} - V_{pre})^2}{N}} \quad (10)$$

Em que:

RMSE – Raiz do erro quadrático médio;

V_{med} – Valor de resposta medido pelo método padrão ($kg.m^{-3}$ para o sensor de massa específica aparente ou % para o sensor de umidade);

V_{pre} – Valor de resposta predita pelo modelo ($kg.m^{-3}$ para o sensor de massa específica aparente ou % para o sensor de umidade);

N – Número de dados experimentais.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y-Y')^2}{df}} \quad (11)$$

Em que:

SE: Erro padrão da estimativa;

Y – Valor estimado da variável;

Y' – Valor real da variável, estimado pelo método padrão;

df: Graus de liberdade do modelo.

Validação dos Sensores

Para validar as curvas de calibração ajustadas para os sensores desenvolvidos, foram obtidos novos valores de massa específica aparente e de teor de água nos grãos de milho e de feijão. Posteriormente foram construídos diagramas de dispersão que relacionavam os valores preditos pelos sensores e os valores experimentais, determinados pelos métodos padrão pertinentes a cada variável. Para estimar o erro entre os valores preditos e os valores determinados foi calculada a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro da estimativa padrão (SE) e o erro máximo (EM).

Tempo de Resposta dos Sensores

Para verificar a existência de diferenças significativas entre o tempo de resposta de cada sensor desenvolvido foi realizada análise de variância pelo teste F a 5 % de nível de significância. Nos casos em que foi verificado diferenças significativas entre as variáveis analisadas foi realizado teste de Tukey para comparação de médias ($\alpha = 5 \%$).

Seleção do melhor sensor para estimativa do teor de água dos grãos

Para selecionar o melhor sensor foram utilizados dois critérios. O primeiro se baseou na precisão da estimativa do teor de água dos grãos (RMSE, SE e EM), e o segundo no tempo de resposta do sensor. Para comparar as variáveis de ambos os sensores foi realizada análise de variância pelo teste F ao nível de 5 % de significância. Nos casos em que foi verificado diferenças significativas entre as variáveis analisadas foi realizado teste de Tukey para comparação de médias ($\alpha = 5 \%$).

3.6 Custo do sistema desenvolvido

Para fins de caracterização do custo de desenvolvimento do sistema proposto foi realizado um orçamento dos componentes utilizados para construção dos sensores e criada uma tabela com a caracterização dos custos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O código do protótipo intitulado Grains Bulk Density and Moisture Content Meter using Arduino Uno encontra-se disponível para download na plataforma GitHub por meio do seguinte link: <https://github.com/guilhermedemouraa/Grains-Bulk-Density-and-Moisture-Content-Meter-using-Arduino-UNO.git>

4.1 Sensor de Massa Específica Aparente

Calibração do Sensor

Foram realizadas cinco medições de massa específica aparente de diferentes materiais (ração animal, grãos de café, de amendoim, de milho e de feijão). Os valores obtidos variaram entre 405,33 e 802,67 kg.m⁻³. Também foram incluídas no modelo de regressão as coordenadas (-3 e 0), referentes ao valor informado pelo sensor quando não há nenhuma carga sendo aplicada sobre ele (tara). A equação de calibração gerada para o sensor e seu respectivo coeficiente de determinação (R²) estão apresentados na Figura 8.

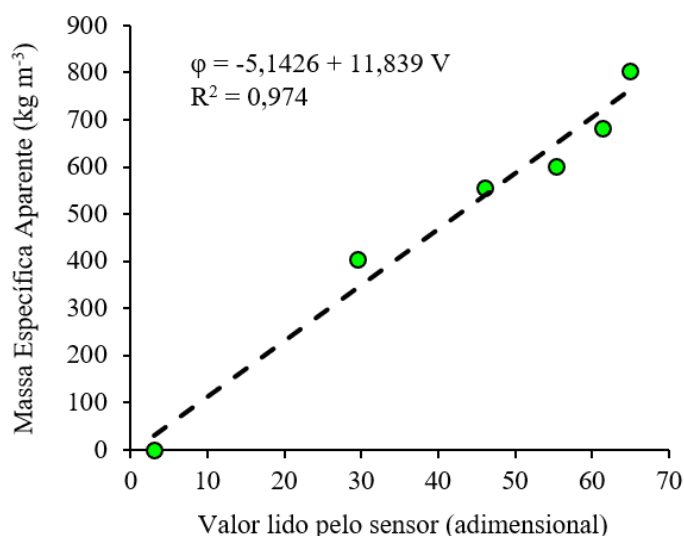


Figura 9 – Calibração do Sensor de massa específica aparente a 20,1 °C e umidade relativa do ar igual a 60,0 %. (●): Dados amostrais; (-): Modelo ajustado a série de dados; φ: Massa específica aparente medida pelo sensor (kg m⁻³); V: Valor lido pelo sensor (adimensional).

Foi observado uma relação diretamente proporcional entre os valores lidos pelo sensor e a massa específica aparente dos materiais utilizados (Figura 9). A partir da equação de calibração foi possível transformar os valores lidos pelo sensor em valores de massa específica aparente. O valor de $R^2 = 0,974$ obtido para a calibração sugere boa correlação entre os valores lidos pelo sensor e os determinados pela balança de peso hectolítrico, sendo considerado um bom indicador de uma calibração eficiente. Além disso, os coeficientes ($a = -5,1426$ e $b = 11,839$) foram significativamente diferente de zero pelo teste t ($p < 0,05$). Pereira (2002) e Chaplin et al. (2004) realizaram calibração de células de carga para avaliarem monitores de produtividade de grãos e reportaram valor de $R^2 = 1$. Entretanto, é importante mencionar que esses autores utilizaram sistema de aquisição de dados modelo CR10X (fabricante CAMPBELL SCIENTIFIC®, Logan – ESTADOS UNIDOS) e NI DAQPad-6015 (fabricante NATIONAL INSTRUMENTS®, Brumadinho – BRASIL), respectivamente. Ambos os sistemas se encontram dentre os mais robustos e precisos disponíveis no mercado, garantindo medições com alta precisão. Contudo, esses sistemas possuem alto custo de aquisição, não sendo compatível com os objetivos deste trabalho.

Validação do Sensor

O sensor foi utilizado para realizar 26 medições de massa específica aparente para amostras de grãos de feijão e de milho. Os valores estimados pelo sensor foram comparados aos determinados por uma balança de peso hectolítrico de 250 ml. O diagrama de dispersão que relaciona os valores da massa específica aparente estimados pelo sensor com os determinados pela balança hectolítrica está apresentado nas Figuras 10 e 11.

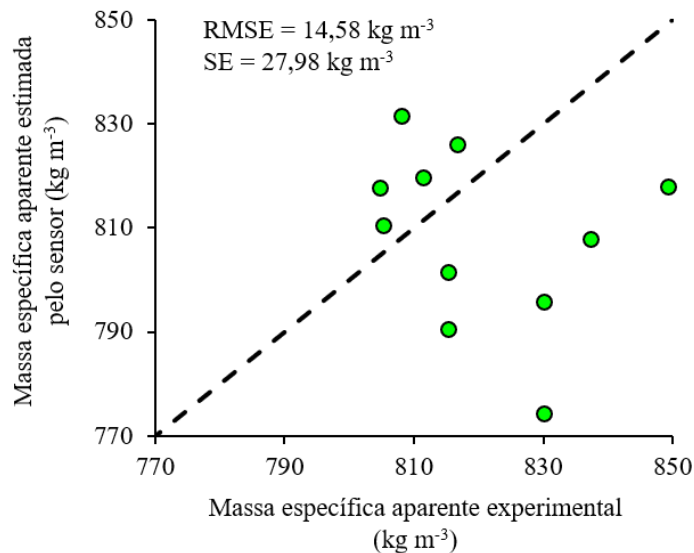


Figura 10 – Diagrama de dispersão do relacionamento entre os valores de massa específica aparente determinados por meio de balança hectolétrica e os valores estimados pelo sensor para os grãos de feijão. (●): Dados amostrais; (–): Linha tracejada representa a correspondência ideal ($y = x$).

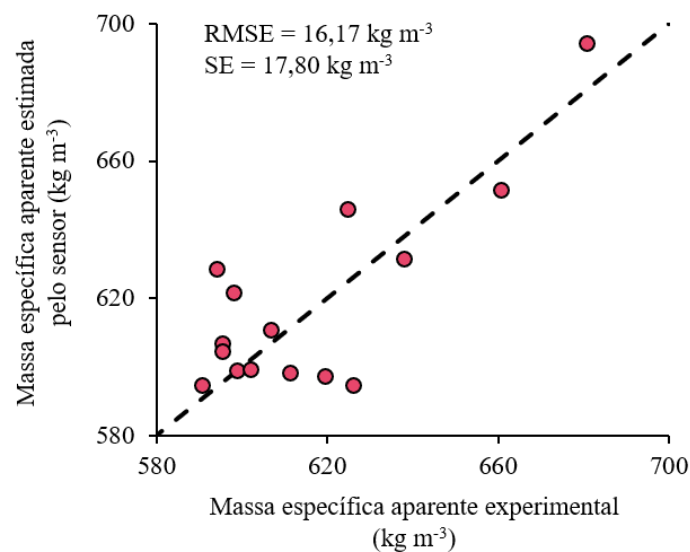


Figura 11 – Diagrama de dispersão do relacionamento entre os valores de massa específica aparente determinados por meio de balança hectolétrica e os valores estimados pelo sensor para os grãos de milho. (●): Dados amostrais; (–): Linha tracejada representa a correspondência ideal ($y = x$).

Verificou-se que a massa específica aparente real dos grãos de feijão variou entre 804 e 850 kg m⁻³, e dos grãos de milho entre 594 e 681 kg m⁻³, ou seja, houve variações de 46 e 87 kg m⁻³, para os grãos de feijão e de milho, respectivamente. Ao determinar a produtividade com base em um valor médio de massa específica aparente a exatidão da produção colhida é bastante reduzida, sobretudo em casos com tamanha variação na massa específica aparente de grãos colhidos dentro de um mesmo lote, como observado nas Figuras 10 e 11. O sensor desenvolvido foi capaz de captar variações de 57,18 e 99,61 kg m⁻³ na massa específica aparente dos grãos de feijão e de milho, respectivamente. Ademais, o sensor apresentou valores de RMSE = 14,58 kg m⁻³ para os grãos de feijão e 16,17 kg m⁻³ para os grãos de milho, justificando sua importância nos monitores de produtividade.

Os maiores valores de erro de estimativa do sensor ocorreram para os grãos que possuíam maiores valores de massa específica aparente para os grãos de feijão, conforme também observado por Berbert et al. (2002) ao relacionarem as propriedades dielétricas de grãos de feijão, variedade *Campeão-3* a sua massa específica aparente. Os grãos de milho não apresentaram tendência visível na distribuição dos erros ao longo de seu intervalo de massa específica aparente. O valor de SE = 17,80 kg m⁻³ para os grãos de milho é compatível aos resultados encontrados por Nelson & Trabelsi (2004). Esses autores relacionaram a massa específica aparente de grãos de trigo e milho as suas propriedades dielétricas (SE = 12 e 32 kg.m⁻³ para os grãos de trigo e milho, respectivamente).

4.2 Sensor de teor de água dos grãos

4.2.1 Determinação do teor de água pelo método dielétrico

Calibração do sensor

O sensor desenvolvido foi utilizado para estimar o valor da constante dielétrica (ϵ') para grãos de feijão e de milho. Foram avaliadas sete amostras de grãos de feijão, variedade *ouro vermelho* e 10 amostras de grãos de milho, *híbrido AG 9025 PRO 3* (SEMENTES AGROCERES, Santa Cruz das Palmeiras – Brasil). As amostras avaliadas de ambas as culturas possuíam teores de água diversos. Os valores de ϵ' foram plotados junto aos seus respectivos teores de água, determinados pelo método padrão da estufa (Figuras 10 e 11).

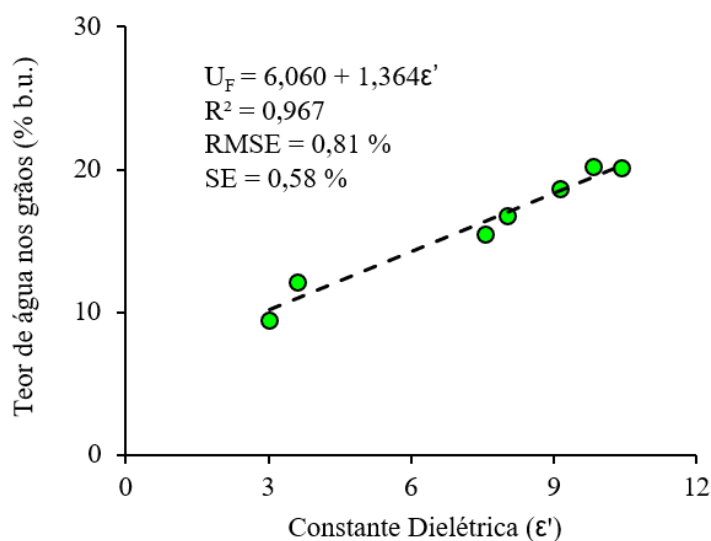


Figura 12 – Calibração do sensor de teor de água dos grãos pelo método dielétrico para os grãos de feijão a 20,1 °C e umidade relativa do ar igual a 60,0 %. U_F : Teor de água dos grãos de feijão (% b.u.); (●): Dados amostrais; (–): Modelo ajustado a série de dados.

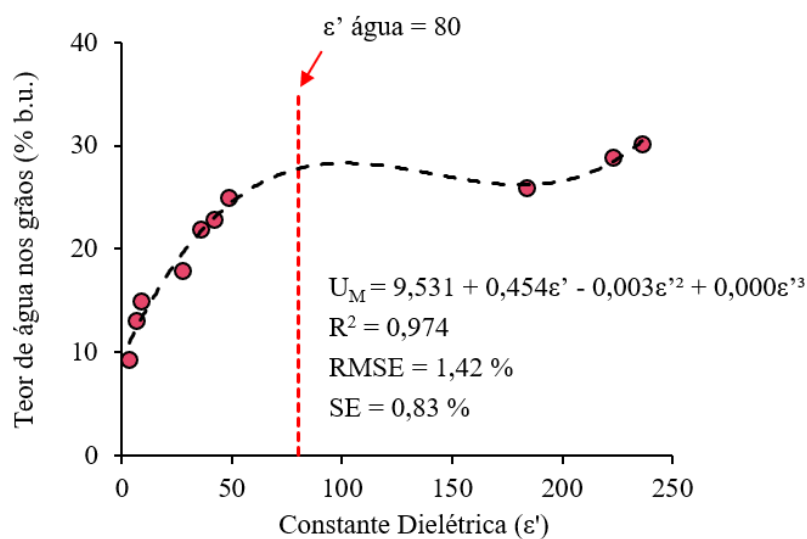


Figura 13 – Calibração do sensor de teor de água dos grãos pelo método dielétrico para os grãos de milho a 20,1 °C e umidade relativa do ar igual a 60,0 %. U_M : Teor de água dos grãos de milho (% b.u.); (●): Dados amostrais; (–): Modelo ajustado a série de dados.

As curvas de calibração do sensor indicaram que os valores da constante dielétrica dos produtos e seus respectivos teores de água estão correlacionados

(Figuras 12 e 13). Esses resultados estão de acordo com os observados por Nelson (1978), que avaliou as propriedades dielétricas de grãos de milho com alto teor de água. Observou-se que os grãos com maior teor de água possuem maiores valores de ϵ' , o que já era esperado, uma vez que a constante dielétrica da água é muito superior a constante dielétrica da matéria seca. Tal comportamento também foi relatado por Nelson & Trabelsi (2012), que avaliaram as propriedades dielétricas de vários produtos agrícolas.

A constante dielétrica dos grãos de feijão aumentou de maneira linear com o aumento dos teores de água (Figura 12). O modelo que melhor se ajustou a série de dados experimentais foi o polinomial de primeiro grau (linear). Os valores de $R^2 = 0,967$, $RMSE = 0,81$ e $SE = 0,58$ ratificam o bom ajuste do modelo linear aos dados experimentais. Esses valores de R^2 e de SE são maiores que 0,89 e 0,4 encontrados por Zhang & Okamura (2001) ao analisarem uma nova função dielétrica para estimativa do teor de água em grãos de maneira independente de sua densidade.

O modelo matemático polinomial de terceiro grau foi o que apresentou melhor ajuste para relacionar o teor de água dos grãos de milho e seus respectivos valores de ϵ' (Figura 13). Contudo, o sensor não apresentou desempenho satisfatório para grãos com teor de água superior a 25 % (Figura 13). A constante dielétrica da água é de aproximadamente 80 e da matéria seca é de aproximadamente 2 (ZOERB, 1993), portanto, é fisicamente impossível que uma amostra de grãos (mistura de matéria seca e água) possua valor de ϵ' inferior a 2 ou superior a 80. Neste sentido, todas as amostras que apresentaram valores de ϵ' superiores a 80 foram excluídas do conjunto de amostras avaliadas e o procedimento de calibração descrito no primeiro parágrafo deste item foi repetido para as amostras restantes (Figura 14). A hipótese mais provável para explicar o mal funcionamento do sensor ao determinar a constante dielétrica dos grãos com alto teor de água recai sob a frequência de excitação utilizada para gerar o campo elétrico atuante no capacitor. Diversos autores estudaram a influência da frequência de excitação do campo elétrico nas propriedades dielétricas de grãos (BERBERT et al., 2002; MOURA et al., 2013; SACILIK & COLAK, 2013; TORREALBA-MELÉNDEZ et al., 2016), sem chegarem a uma conclusão unânime acerca de qual a frequência ideal para minimizar os erros das medições realizadas. Contudo, foi observado por esses autores que quanto menor a frequência de excitação maior são os valores obtidos para a constante

dielétrica dos materiais testados. A frequência de excitação do campo elétrico pode ser modificada ao se alterar o valor da resistência presente no circuito, ou seja, seriam necessários componentes externos ao conjunto capacitor-microcontrolador.

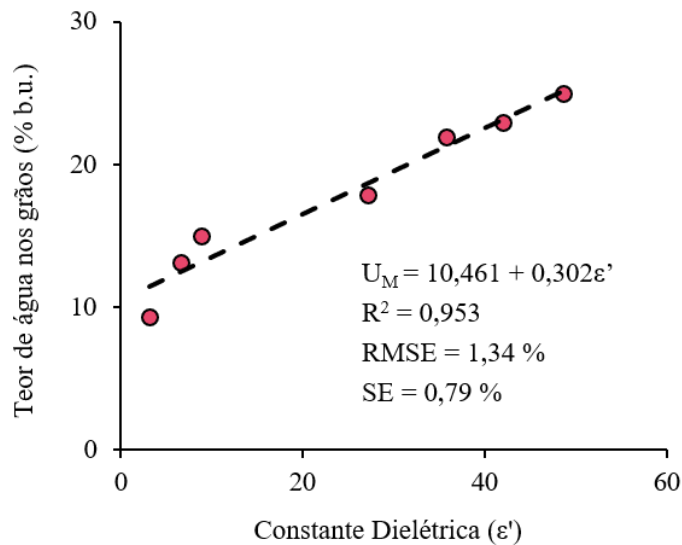


Figura 14 – Re-calibração do sensor de teor de água dos grãos pelo método dielétrico para os grãos de milho a 20,1 °C e umidade relativa do ar igual a 60,0 %. U_M : Teor de água dos grãos de milho (% b.u.); (●): Dados amostrais; (–): Modelo ajustado a série de dados.

A nova equação de calibração resultou em um polinômio de primeiro grau, assim como encontrado para os grãos de feijão, e resultou em $R^2 = 0,953$, $RMSE = 1,34$ e $SE = 0,79$. Os resultados publicados por Nelson (1978) ao avaliar as propriedades dielétricas de grãos de milho com alto teor de água também sugerem uma relação linear entre o teor de água dos grãos e ϵ' para grãos com teor de água inferior a 35 %. Kandala et al. (1989) reportaram $SE = 0,62$ ao estimarem o teor de água em grãos de milho por meio de medições elétricas não destrutivas.

Validação do sensor

Para validar a calibração do sensor foram realizadas quatro medições de ϵ' para grãos de feijão e cinco para grãos de milho. A partir dos dados coletados estimou-se o teor de água dos grãos por meio das Equações de calibração apresentadas nas figuras 12 e 14, para os grãos de feijão e de milho, respectivamente. Os valores estimados pelas equações foram comparados aos determinados pelo método padrão da estufa. Os diagramas de dispersão que relacionam os valores do

teor de água preditos pelas equações de calibração com os teores de água determinados pelo método padrão da estufa estão apresentados nas Figuras 15 e 16.

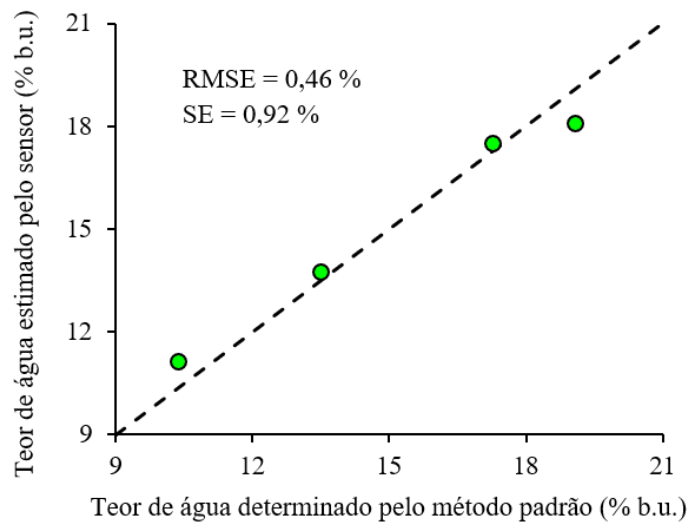


Figura 15 – Diagrama de dispersão do relacionamento entre o teor de água determinado pelo método padrão da estufa com os valores estimados pela equação de calibração do método dielétrico para amostras de feijão. (●): Dados amostrais; (–): Linha tracejada representa a correspondência ideal ($y = x$).

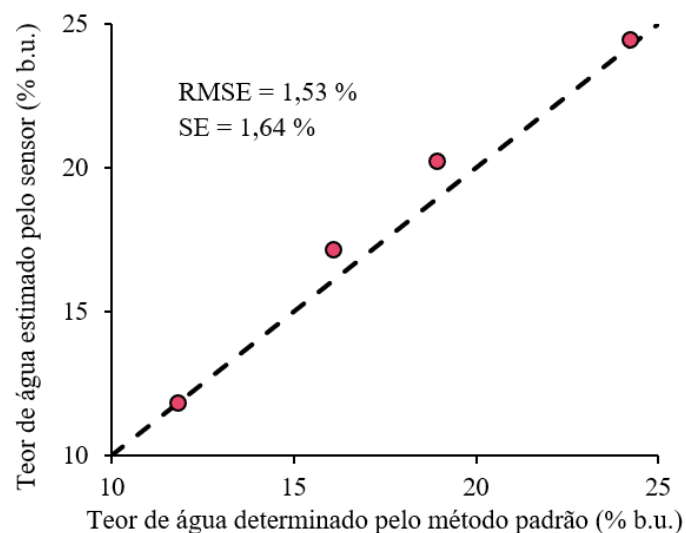


Figura 16 – Diagrama de dispersão entre os valores de teores de água determinados pelo método padrão de estufa e valores estimados pela equação de calibração do método dielétrico para amostras de milho. (●): Dados amostrais; (–): Linha tracejada representa a correspondência ideal ($y = x$).

A utilização das Equações de calibração para estimava do teor de água resultou em SE = 0,92 e 1,26 e EM = 0,95 e 1,35 pontos percentuais para os grãos de feijão e de milho, respectivamente. Moura et al. (2013) realizaram um estudo semelhante a este com grãos de sorgo, e reportaram valores de SE = 1,1 e EM = 3,4. Os valores de RMSE (0,46 e 0,78, feijão e milho, respectivamente) são próximos a 0,4 e 1,3 reportados por Kim et al. (2003) e Digman et al. (2012), respectivamente. Kim et al. (2003) avaliaram o desempenho de um medidor de umidade online de impedância em radiofrequências para grãos de arroz, trigo e cevada, e Digman et al. (2012) avaliaram um ressonador de microondas planar para estimar o teor de água de grãos de milho e soja.

Os maiores erros de estimativa ocorreram para grãos com maiores teores de água, resultado também observado por Kandala et al. (1990) e Nelson (1978). Em geral, os valores de erro observados na calibração do sensor são compatíveis aos de outros trabalhos científicos, conforme mencionado no parágrafo anterior.

4.2.2 Determinação do teor de água com base na temperatura e umidade relativa do ar intergranular

A umidade relativa do ar e temperatura intergranular variaram entre 59,3 e 99,9 %, e 17,3 e 24,7 °C, respectivamente. Para selecionar o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foram utilizados dados de temperatura e umidade relativa do ar intergranular de 37 medições, coletados pelos sensores AM2302. A partir dos dados coletados, foi estimado o teor de água dos grãos por meio das equações 1 a 4. Esses valores estimados foram comparados aos valores experimentais, obtidos pelo método padrão da estufa. Os diagramas de dispersão que relacionam os valores do teor de água preditos pelos modelos e os teores de água determinados método padrão da estufa estão apresentados na Figura 17.

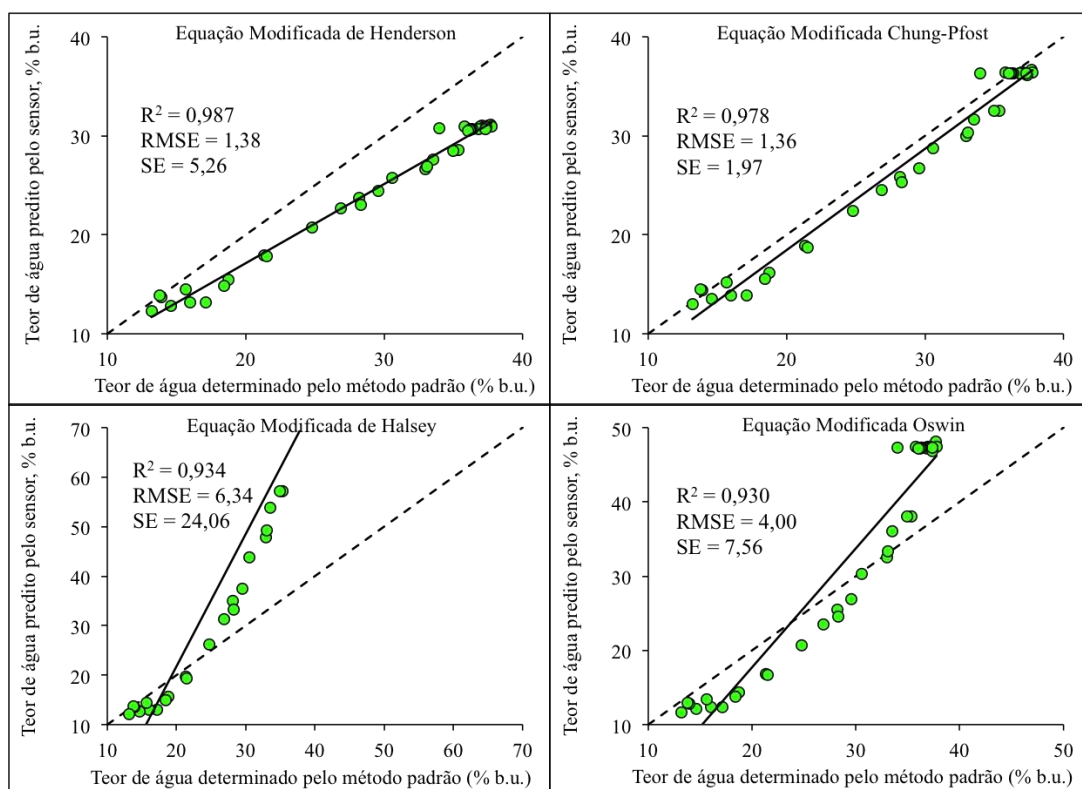


Figura 17 – Diagrama de dispersão para validação dos modelos analisados. (●): Dados amostrais; (---): $y = x$; (-): Reta de ajuste dos modelos.

Verificou-se que as equações modificadas de Henderson e Chung-Pfost apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais do que os modelos de Oswin e Halsey (Figura 17). Em estudo semelhante, Chen & Morey (1989) concluíram que os modelos propostos por Henderson e Chung-Pfost são apropriados para se estimar o teor de água de equilíbrio em grãos com alto teor de amido e materiais fibrosos. Ainda, os autores concluíram que a equação modificada de Oswin apresentou ótimo ajuste para grãos de algumas variedades de milho e trigo. Sun (1999) estudou a performance das equações (1) a (4) para prever o teor de água de equilíbrio em grãos de diversos produtos e sementes oleaginosas. Esse autor concluiu que as equações de Chung-Pfost e Oswin obtiveram o melhor ajuste para grãos de milho, trigo, arroz e canola. Gely & Pagano (2012) reportaram que a equação modificada de Henderson apresentou o melhor desempenho ao estimar o teor de água de equilíbrio em grãos de cevada. A cevada (*Hordeum vulgare*) é uma gramínea cerealífera, e, assim como o milho, pertence à família Poaceae.

As equações modificadas de Henderson e Halsey apresentaram maiores erros de estimativa do teor de água, quando os grãos apresentaram umidade superior a 25

% . Resultado semelhante foi observado quando se utilizou o modelo proposto por Oswin para determinar a umidade quando o teor de água era superior a 35 %. A equação proposta por Chung-Pfost apresentou erros aleatórios para toda a faixa de umidade analisada. (Figura 17). Em geral, as equações modificadas de Henderson e Chung-Pfost subestimaram o teor de água.

A utilização da equação modificada de Chung-Pfost para determinar o teor de água apresentou menores valores de RMSE e SE, seguida pelas equações modificadas de Henderson, Oswin e Chung-Pfost, respectivamente (Figura 17). Na determinação do teor de água de equilíbrio, Rodriqez-Arias (1965) e Gustafson & Hall (1974) reportaram que o modelo proposto por Oswin apresentou menor valor SE (2,56 e 2,92, respectivamente). Rodriqez-Arias estudou isoterms de dessecção e taxas de secagem em grãos de milho para diferentes temperaturas. Gustafson & Hall estudaram as equações de equilíbrio higroscópico para grãos de milho em várias temperaturas. Já Chen & Morey (1989) e Kumar et al. (1978) reportaram menores valores de SE para a equação modificada de Henderson (3,70 e 1,88 respectivamente). Os modelos avaliados com menor RMSE e SE resultaram nos maiores valores de R^2 , conforme também observado por Rodriqez-Arias (1965), Gustafson & Hall (1974), Kumar et al. (1978) e Chen (1988). Na literatura revisada o valor RMSE não foi reportado por nenhum outro pesquisador. Contudo, os modelos que apresentaram menor SE também apresentaram menor RMSE, indicando uma correlação entre os dois índices. Todavia, para os critérios avaliados adotou-se o modelo de Chung-Pfost para realizar a estimativa do teor de água dos grãos.

Ao comparar-se os resultados obtidos estimando-se o teor de água pelo método dielétrico e pelo método das EEH observou-se que o método dielétrico apresentou resultados mais precisos. O sensor construído com base no método dielétrico apresentou menor valor de RMSE (0,78 vs. 1,38) e menores valores de erro máximo (1,37 vs. 3,27 %). Contudo, o sensor que utiliza as EEH é mais simples e fácil de manusear. Já o sensor construído pelo método dielétrico requer maior habilidade para ser manuseado, uma vez que os grãos devem ser inseridos no sistema de acordo com uma metodologia específica. Considerando-se as condições de campo ambos os sensores apresentam desvantagens, o sensor que estima o teor de água pelo método dielétrico sofreria grande influência de impurezas colhidas junto aos grãos, tal como poeira, pedras e galhos, já o sensor que utiliza as EEH sofreria influência de

externalidades climáticas, tal como chuvas e orvalho. Há que se calibrar ambos os sensores para condições de campo para que conclusões mais assertivas possam ser tomadas.

4.3 Tempo de Resposta dos Sensores

O tempo de resposta dos sensores foi analisado individualmente para cada etapa de calibração dos sensores. Nas Tabelas 2, 3 e 4 são apresentados o valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação para estimativa do tempo de resposta dos sensores desenvolvidos.

Tabela 2 – Tempo de resposta do sensor de massa específica aparente

Produto/	Ração	Café	Amendoim	Milho	Feijão
MEA	(405 kg.m ⁻³)	(556 kg.m ⁻³)	(602 kg.m ⁻³)	(683 kg.m ⁻³)	(802 kg.m ⁻³)
Média (s)	6,00	6,67	5,67	7,67	5,67
DP (s)	1,00	0,58	0,58	1,15	0,58
CV (%)	16,7	8,7	10,2	15,1	10,2

DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação; p valor = 0,059

O tempo de resposta do sensor de massa específica aparente variou entre 5,67 e 7,67 s (Tabela 2). Contudo, os dados não apresentaram diferença estatística ao nível de 5 % de significância, sendo assim, concluiu-se que o sensor possui em média o mesmo tempo de resposta, independentemente da carga aplicada sobre ele. Este resultado já era esperado, uma vez que o tempo de resposta deste sensor é função do tempo requerido pelo microcontrolador para se comunicar com o amplificador de sinal conectado as células de carga e processar o sinal. Em geral, observou-se valores baixos ($0\% < CV < 12\%$) e médios ($12\% < CV < 62\%$) para o coeficiente de variação (WARRICK & NIELSEN), indicando estabilidade do sensor ao estimar os valores desejados.

Tabela 3 – Tempo de Resposta do sensor de teor de água dos grãos pelo método dielétrico

Produto/	Feijão	Feijão	Feijão	Milho	Milho	Milho
Teor de água	(20,2 %)	(15,5 %)	(9,4 %)	(28,9 %)	(17,9 %)	(11,8 %)
Média (s)	30,33a	33,67a	29,33a	62,33b	32,00a	34,67a
DP (s)	2,08	4,04	3,79	3,51	1,00	3,06
CV (%)	6,9	12,0	12,9	5,6	3,1	8,8

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem significativamente ao nível de 5% pelo teste de Tukey. DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação.

Ao se realizar análise de variância nos dados referentes ao tempo de resposta do sensor de teor de água pelo método dielétrico verificou-se que houve diferença estatística entre os dados ($p\text{-valor} = 1,41 \times 10^{-7}$), portanto utilizou-se o teste de Tukey ($\alpha = 5\%$) para processar os dados. O tempo requerido, para coletar os dados referentes as amostras de milho com alto teor de água (28,9 %), foi muito superior aos demais tratamentos (Tabela 3), mais uma vez indicando mal funcionamento do sensor ao determinar a constante dielétrica de grãos com alto teor de água.

Tabela 4 – Tempo de Resposta do sensor de teor de água dos grãos por meio de equações de equilíbrio higroscópico

Experimento	Teor de água no grão (% , b.u.)*					Temperatura Intergranular (°C)**					
Tratamento	37,7	31,7	28,2	19,8	13,6	-1,0	10,0	20,0	25,0	0,0	45,0
Média (min)	18,7a	40,8a	19,6a	19,7a	17,7a	1,3b	1,9b	1,7b	2,6b	2,1b	1,1b
DP (min)	15,9	68,9	21,4	38,0	15,6	0,3	1,2	1,3	1,4	0,9	0,5
CV (%)	85,0	169,0	110,0	193,0	88,0	19,0	64,0	76,0	53,0	41,0	44,0

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem significativamente ao nível de 5 % pelo teste de Tukey. DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação; *p valor = 0,557; **p valor = 0,357.

O tempo de resposta do sensor variou entre 17,7 e 40,8 minutos para estimar a umidade relativa do ar e entre 1,1 e 2,6 minutos para estimar a temperatura intergranular (Tabela 4). O tempo de resposta do sensor para estimar a variável temperatura é inferior ao tempo de resposta para estimar a variável teor de água dos grãos (Tabela 3). Desta forma, visando obter leituras confiáveis para ambas as variáveis foi adotado como tempo de resposta do sensor o valor de 41 minutos.

Foram observados elevados valores de desvio padrão, indicando instabilidade do sensor ao estimar os valores desejados. Essa instabilidade culminou na não verificação de diferença estatística entre os tratamentos aplicados para uma mesma variável (Tabela 4). O elevado valor do tempo de resposta não foi mencionado em nenhum outro trabalho revisado que utilizou o mesmo sensor (AM2302), portanto, há de se investigar cuidadosamente as causas que levaram a este resultado. A hipótese mais provável é de que os grãos possivelmente ainda não haviam atingido equilíbrio higroscópico com o ar ambiente, o que ocasionou os altos valores obtidos para o tempo de resposta do sensor. A Figura 18 ilustra a variação da umidade relativa do ar intergranular em função do tempo, medida por quatro diferentes sensores AM2302 quando o teor de água dos grãos era de 31,7 %.

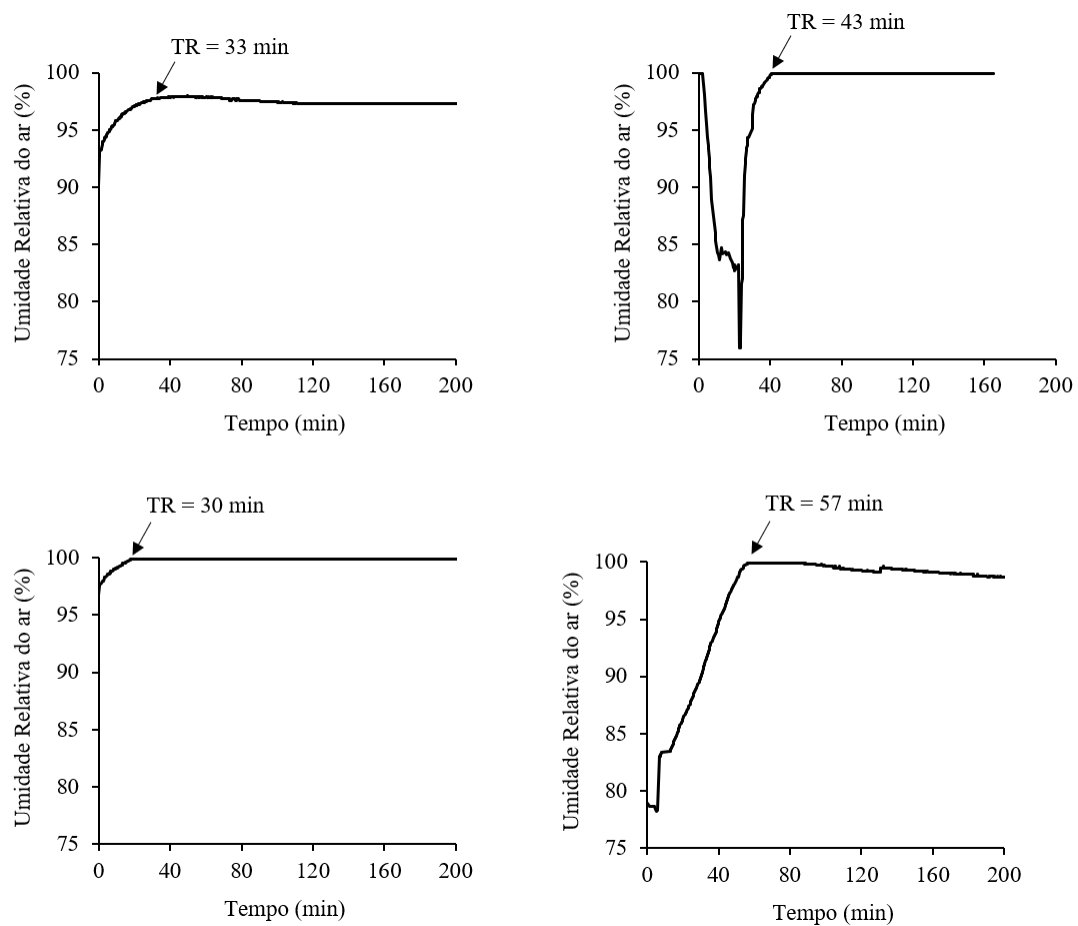


Figura 18 – Variação da umidade relativa do ar em função do tempo medida por quatro diferentes sensores AM2302. TR: Valor adotado como tempo de resposta do sensor.

O tempo de resposta do sensor de teor de água que utilizou o método dielétrico foi inferior ao do sensor que utilizou as EEH (Tabelas 3 e 4). O tempo necessário para realizar medições pelo método dielétrico foi, em média, da ordem de segundos, excetuando-se grãos com teor de água elevado. O método das EEH apresentou como melhor resultado o valor de 17,7 minutos para realizar leituras confiáveis. O método dielétrico apresentou menores erros ao estimar o teor de água dos grãos e menor tempo de resposta do que o método das EEH. Sendo assim, o método dielétrico foi adotado para se realizar medições do teor de água.

A hipótese de que um sensor poderia ser utilizado para calibrar o outro foi refutada, uma vez que o sensor que utilizou o método das EEH não apresentou nenhuma vantagem visível frente ao método dielétrico tendo em vista sua adaptação para monitores de produtividade. Contudo, em operações que não demandam aquisição de dados em tempo real, tal como armazenamento de grãos, o sensor que utiliza as EEH pode ser utilizado. O método dielétrico pode ser utilizado periodicamente para realizar uma calibração dinâmica do método que utiliza as EEH.

4.4 Levantamento do custo de desenvolvimento do sistema

O valor de cada componente utilizado no desenvolvimento do sistema proposto foi orçado online em websites nacionais que emitem nota fiscal dos produtos. Por se tratar de um trabalho científico com o objetivo de desenvolver uma plataforma open hardware e open software o custo relacionado a mão de obra não foi incluído no preço final do sistema. A caracterização de cada componente e seus respectivos custos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização dos custos dos componentes utilizados para desenvolver o sistema de medição de massa específica aparente e teor de água.

Componente	Custo unitário (R\$)	Unidades	Preço final (R\$)	Fonte
Arduino UNO	39,90	1	39,90	Baú da Eletrônica
Display	16,90	1	16,90	FILIFELOP
Sensor AM2302	24,40	1	24,40	Curto Circuito
Célula de carga	16,90	4	67,60	FILIFELOP
Amplificador	9,90	1	9,90	FILIFELOP
Servo Motor	34,90	1	34,90	Baú da Eletrônica
Jumpers	0,19	30	5,73	FILIFELOP

Módulo SD Card	9,90	1	9,90	FILIFELOP
Cartão de memória	21,88	1	21,88	Lojas Americanas
Caixa de proteção	16,15	1	16,15	ROBOHELP
Chapa de madeira*	24,79	1	24,79	Casas Bahia
Base metálica	30,00	1	30,00	C-METAL
Cilindro interno	10,60	1	10,60	ALUMINIOABC
Cilindro externo	5,10	1	5,10	ALADIM METAIS
CUSTO TOTAL			317,74	

*A chapa de madeira foi utilizada para fazer a placa de madeira apresentada no sistema e o mecanismo de quatro barras.

O sistema desenvolvido teve um custo total de R\$ 317,74, sendo caracterizado como baixo custo (BITELLA, 2014). Sendo assim, é possível incorporar a estrutura proposta à monitores de produtividade direcionados a colhedoras tracionadas por tratores agrícolas, tornando possível a difusão da agricultura de precisão a pequenos produtores.

5 CONCLUSÕES

Por meio de regressão matemática foi possível estabelecer curvas de calibração para os sensores de massa específica aparente, teor de água pelo método dielétrico e teor de água por meio de equações de equilíbrio higroscópico. Todas as curvas geradas apresentaram bom ajuste aos dados experimentais, estando em acordo com outros trabalhos científicos revisados.

O sensor desenvolvido para estimativa do teor de água por meio do método dielétrico não apresentou bom funcionamento para grãos com teor de água acima de 25 %.

O melhor modelo para calibração dos grãos de feijão e de milho pelo método dielétrico foi o modelo linear.

O modelo que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais para a determinação do teor de água pelo método das equações de equilíbrio higroscópico foi o de Chung-Pfost.

O sensor para estimativa do teor de água pelo método dielétrico apresentou menores erros e menor tempo de resposta do que o método que utilizava equações de umidade de equilíbrio higroscópico.

O tempo de resposta foi de 8 segundos para o sensor de massa específica aparente; 63 segundos para o sensor de teor de água pelo método dielétrico; e 41 minutos para o sensor de teor de água pelo método as equações de equilíbrio higroscópico.

Foi construído um equipamento de fácil replicação e atualização, com custo total de construção de R\$ 314,74. O equipamento desenvolvido era condizente com a abordagem de código aberto, na qual o compartilhamento de informações sobre hardware e software de equipamentos facilita a implementação e a melhoria contínua das tecnologias existentes. O sistema desenvolvido apresenta potencial para adaptação e instalação em monitores de produtividade de colhedoras tracionadas por tratores.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLO, F.; GOBBI M.; MASTINU, G.; PREVIATI, G. Advances in force and moments measurements by an innovative six-axis load cell. **Experimental Mechanics**, v. 54, n. 4, p. 571, 592, 2014.
- BANSAL, N.; DHALIWAL, A. S.; MANN, K. S. Dielectric properties of corn flour from 0.2 to 10 GHz. **Journal of Food Engineering**, v. 166, p. 255-262, 2015.
- BARTLEY, J. R. P. G.; NELSON, S. O.; MCCLENDON, R. W. Dimensional analysis of a permittivity measurement probe, **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 51, n. 6, p. 1312–1315, 2002.
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; MELO, E. C. Dielectric properties of common bean. **Biosystems Engineering**, v. 83, p. 449-462, 2002.
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUSA, E. F.; DETMANN, E.; VIANA, A. P.; DIONELLO, R. G. Adaptação da função dielétrica $\{\varepsilon''/[\varepsilon'(\alpha_f \varepsilon' - \varepsilon'')]\}$ para determinação do teor de água em sementes de feijão por radio-frequências. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, p. 266-273, 2004b.
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUSA, E. F.; VIANA, A. P.; DETMANN, E.; CARLESSO, V. O. Avaliação de três modelos dielétricos derivados função $[(\varepsilon' - 1) / \varepsilon'']$ na estimativa do teor de água de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, p. 92-101, 2004a.
- BIRKEFELD, L. D.; AZAD, A. M.; AKBAR, S. A. Carbon monoxide and hydrogen detection by anatase modification of titanium dioxide. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 75, n. 11, p. 2964-2968, 1992.
- BITELLA, G.; ROSSI, R.; BOCHICCHIO, R.; PERNIOLA, M.; AMATO, M. A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. **Sensors**, v. 14, p. 19639-19659, 2014.
- BLAKEBOROUGH, A.; CLÉMENT, D.; WILLAMS, M. S.; WOODWARD, N. Novel load cell for measuring axial force, shear force, and bending movement in large-scale structural experiments. **Experimental Mechanics**, v. 41, n. 1, p. 115-122, 2002.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Departamento de Propriedade Intelectual e Tecnologia da Agropecuária. Agricultura de Precisão, Boletim Técnico. Brasília: Mapa/ACS, 2013.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. 1. ed. New York: Springer Science & Business Media, 1992.

- CHAPLIN, J.; HEMMING, N.; HETCHLER, B. Comparison of impact plate and torque based grain mass flow sensors. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 4, p. 1337-1345, 2004.
- CHEN, C. **A study of equilibrium relative humidity for yellow dent corn kernels**. 1988. Tese (Doutorado em Bioproducts and Biosystems Engineering) – Departamento de Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota: St. Paul, 1988.
- CHEN, C.; MOREY, R. V. Comparison of four EMC/ERH equations. **Transactions of the ASAE**, v.32, n. 3, p. 983-990, 1989.
- CHEN, H.; WANG, J.; ZHANG, B.; FUHLBRIGGE, T. Modeling and analysis of robotic wheel loading process in trim-and-final assembly. **Industrial Robotic International Journal**, v. 38, p. 614–621, 2011.
- COELHO, A. M. **Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas**. EMPRAPA, Sete Lagoas, 2005.
- COSTA, A. R. D.; FARONI, L. R. D. A.; ALENCAR, E. R. D.; CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, L. G. Quality of corn grain stored in silo bags. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 2, p. 200-207, 2010.
- CSIBA, M.; KOVÁCS, A. J.; VIRÁG, I.; NEMÉNYI, M. The most common errors of capacitance grain moisture sensors: effect of volume change during harvest. **Precision Agriculture**, v. 14, p. 215–233, 2013.
- DAVIES, C. E.; TALLON, S. J.; BROWN, N. Continuous monitoring of bulk density and particle size in flowable powders and grains. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 83, p. 782-787, 2005.
- DEMIATE, I. M.; FIGUEROA, A. M.; GUIDOLIN, M. E. B. Z.; SANTOS, T. P. R.; YANGCHENG, H.; CHANG F.; JANE, J. Physicochemical characterization of starches from dry beans cultivated in Brazil. **Food Hydrocolloids**, v. 61, p. 812-820, 2016.
- DIGMAN, M.F.; CONLEY, S. P.; LAUER, J. G. Evaluation of a microwave resonator for predicting grain moisture independent of bulk density. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 28, n. 4, p. 611–617, 2012.
- FIOREZE, R. **Adaptação do modelo de Thmpson para simulação de secagem de raspas de mandioca (*Manihot esculenta sp.*)**. 1982. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba: João Pessoa.
- GANG, J.; WEN-QIANG, F.; PENG-FEI, H.; YUN-XUE, L. Design of multi-point wireless temperature and humidity sensor network based on NRF24101. **Information Technology Journal**, v. 12, n. 20, p. 5811–5817, 2013.

GELY, M. C.; PAGANO, A. M. Moisture desorption isotherms and isosteric heat of sorption characteristics of malting barley (*Hordeum distichum L.*). **Latin American Applied Research**, v. 42, p. 237-243, 2012.

GOLDBERG, K. What is automation?. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 9, n. 1, p. 1-2, 2012.

GRIFFIN, J. Circuits in Practice: The Wheatstone bridge, what it does, and why it matters. Massachusetts Institute of Technology (MIT) – ES.333 class video. Disponível em <<<https://www.youtube.com/watch?v=-G-dySnSSG4>>>. Acesso em 20/08/2018.

GRISSE, R.D.; JASA, P.J.; SCHROEDER, M.A.; WILCOX, J.C. Yield monitor accuracy: successful farming magazine case study. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 18, n. 2, p. 147–151, 2002.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

GUSTAFSON, R. J.; HALL, G. E. Equilibrium moisture content of shelled corn from 50 to 155 °F. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 1, p. 120-124, 1974.

HALDER, D.; PANDA, R. K.; SRIVASTAVA, R. K.; KHEROAR, S. Evaluation of the CROPGRO-peanut model in simulating appropriate sowing date and phosphorus fertilizer application rate for peanut in a subtropical region of eastern India. **The Crop Journal**, v. 5, p. 317-325, 2017.

HONG, T.; KIM, J.; JEONG, J.; LEE, M.; JI, C. Automatic calibration model of a building energy simulation using optimization algorithm. **Energy Procedia**, v. 105, p. 3698-3704, 2017.

HOOVER, R.; HUGHES, T.; CHUNG, H. J.; LIU, Q. Composition, molecular structure, properties and modification of pulse starches – A review. **Food Research International**, v. 43, p. 399-413, 2010.

JAKOVLJEVIC, Z.; PETROVIC, P. B.; HODOLIC, J. Contact states recognition in robotic part mating based on support vector machine. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 59, p. 377–395, 2012.

KANDALA, C. V. K.; NELSON, S. O. Measurement of moisture content in single kernels of peanuts: A nondestructive electrical method. **Transactions of ASAE**, v. 33, 1990.

KANDALA, C. V. K.; NELSON, S. O.; LAWRENCE, K. C. Non-destructive measurement of moisture content in single kernels of corn. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 44, p. 125-132, 1989.

KIM, K. B.; LEE, J. W.; LEE, S. S.; NOH, S. H.; KIM, M. S. On-line measurement of grain moisture content using RF impedance. **Transactions of ASAE**, v. 46, n. 3, p. 861–867, 2003.

KNIGHT, R. D. **Physics for scientists and engineers. A strategic approach.** 2. ed. Londres: Benjamin Cummings, 2007.

KUMAR, A.; HERUM, F. L.; BLAISDELL, J. L. Equilibrium moisture content of intact corn ears and component parts. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 78, p. 30-54, 1978.

LAWRENCE, K. C.; WINDHAM W. R.; NELSON S. O. Wheat moisture determination by 1- to 110-MHz swept-frequency admittance measurements. **Transactions of the ASAE**, v. 41, n. 1, p. 135-142, 1998.

LEMOS, M. Arduino: Conheça essa plataforma de hardware livre e suas aplicações. BLOG Fazedores. Disponível em: <<[http:// http://blog.fazedores.com/arduino-conheca-esta-plataforma-de-hardware-livre-e-suas-aplicacoes/](http://blog.fazedores.com/arduino-conheca-esta-plataforma-de-hardware-livre-e-suas-aplicacoes/)>>. Acesso em 04 de jun. de 2018.

LI, M.; CEHN, Y. An investigation of response time of Tio₂ thin-film oxygen sensors. **Sensor and Actuators B: Chemical**, v. 32, p. 83-85, 1996.

LOGHAVI, M.; EHSANI, R.; REEDER, R. Development of a portable grain mass flow sensor test rig. **Computers and electronics in agriculture**, v. 61, no. 2 p. 160-168, 2008.

MARTIN-GARIN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J. A.; BAÏRI, A.; MILLÁN-MEDEL, J.; SALA-LIZARRAGA, J. M. Environmental monitoring system based on an open source platform and the internet of things for a building energy retrofit. **Automation in Construction**, v. 87, p. 201-214, 2018.

MATHEWS, J. Automatic moisture content control for grain driers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 8, n. 3, p. 207- 220, 1963.

MOURA, E. E.; BERBERT, P. A.; BERBERT-MOLINA, M.; OLIVEIRA, M. T. R. Performance analysis of RF dielectric models for density-independent estimation of moisture content in sorghum. **Powder Technology**, v. 246, p. 369-378, 2013.

National Institute of Standards and Technology (NIST). **Examination of grain moisture meters using air-oven reference method transfer standards.** Washington, 2017. Appendix B. Grain Moisture Air-Oven Reference Methods in the United States, AO_3.

NAVARRO, S.; NOYES, R.T. **The mechanics and physics of modern grain aeration management.** 1. ed. New York: CRC Press, 2002. 647 p.

NELSON, S. O. Grain and seed moisture sensing applications. In: NELSON, S.O. 1. ed. **Dielectric properties of agricultural materials and their applications.** New York: Academic Press, 2015: p. 77-108.

NELSON, S. O. Electrical properties of agricultural products - A critical review. **Transactions of the ASAE**, v. 16, n. 2, p. 384-400, 1973.

NELSON, S. O. Factors affecting the dielectric properties of grain. **Transactions of the ASAE**, v. 25, n. 4, p. 1045-1049, 1982.

NELSON, S. O. Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of high-moisture corn, **Journal of Microwave Power**, v. 13, n.2, p. 213-218, 1978.

NELSON, S. O.; TRABELSI, S. Calibration methods for nondestructive microwave sensing of moisture content and bulk density of granular materials. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 6, p. 1999-2008, 2004.

NELSON, S. O.; TRABELSI, S. Factors influencing the dielectric properties of agricultural and food products. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v. 46, n. 2, p. 93-107, 2012.

NELSON, S.O. Fundamentals of dielectric properties measurements and agricultural applications. **Journal of Microwave power and electromagnetic energy**, v. 44, n. 2, p. 98-113, 2010.

NETHERCOTT, J. Capacitance Meter MK II. PIC Tutorials – Electronic and programming simplified. Disponível em: <<
<http://wordpress.codewrite.co.uk/pic/2014/01/21/cap-meter-with-arduino-uno/>>>.
Acesso em: 20 de out. de 2018.

PARASURAMAN, R.; RILEY, V. Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. **Human factors**, v. 39, n. 2, p. 230-53, 1997.

PAS, G. F.; TEETS, C. L. Effect of planting density on yield, nutritional quality, and ruminal in vitro digestibility of corn for silage grown under on-farm conditions. **The Professional Animal Scientist**, v. 33, p. 420-425, 2017.

PEREIRA, F. J. S. **Construção de uma bancada de ensaio e avaliação de um sistema de mensuração da produtividade de grãos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Máquinas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz: Piracicaba.

RAMOS, M. C.; ANDRADE, V. S. Desenvolvimento, construção e calibração de uma central de monitoramento de consumo de energia elétrica e água utilizando o microcontrolador Arduino. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 2, p. 39-50, 2016.

RASMUSSEN, H. E.; ANDERSON, J. A. A simple electric meter for estimating the moisture content of grain. **Canadian Journal Research**, Section 27, p. 249-252, 1949.

RODRIGUEZ-ARIAS, J. H. **Desorption isotherms and drying rates of shelled corn in the temperature range of 40 to 140 F**. 1956. Tese (Doutorado em Biosystems and Agricultural Engineering) – Departamento de Biosystems and Agricultural Engineering, Michigan State University: East Lansing.

SACILIK, K.; COLAK, A. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. **Powder Technology**, v. 203, no. 2 p. 365-370, 2010.

SANTOS, F. F. L.; ARAUJO, G. M.; SANTOS, L. F. L.; TAVARES, L. C. M.; MARTINS, R. N.; SILVA, F. C. Elaboration of an open source prototyping platform for salubrity monitoring in agricultural machinery. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 24, n. 2, p. 1-10, 2018.

SAUL, R. A.; STEELE, J. L. Why damaged shelled corn costs more to dry. **Agricultural Engineering**, v. 47, n. 6, p. 326–329, 1966.

SCARPA, M.; RAVAGNIN, R.; SCHIBUOLA, L.; TAMBANI, C. Development and testing of a platform aimed at pervasive monitoring of indoor environment and building energy. **Energy Procedia**, v. 126 p. 282-288, 2017.

SCHMIDT, S. Então. Como uma célula de carga realmente trabalha?. HBM. Disponível em: << <https://www.hbm.com/pt/6768/como-uma-celula-de-carga-trabalha/>>>. Acesso em 04 de jun. de 2018.

SHAKER, M.; IMRAN, A. A. Greenhouse micro climate monitoring based on WSN with smart irrigation technique. **International Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 7, n. 12, p. 1566–1571, 2013.

SUN, D. Comparison and selection of EMC/ERH isotherm equations for drying and storage of grain and oilseed. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, 1999.

VAN DEN BERG, C.; BRUIN, S. Water activity and its estimation in food systems: Theoretical aspects. In: L. B. Rockland and G. F. Steward (ed.). **Water Activity: Influences on Food Quality**. New York: Academic Press, 1981. p. 2-61.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. Editors. **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-44.

WILD, K.; HAEDICKE, S. Improving the accuracy of moisture sensors for forage crops. In: **Book of Abstracts 5 ECPA-2 ECPLF**. Sweden: JTI, 2005. p. 326–328.

ZANDONADI, R. S.; STOMBAUGH, T. S.; SHEARER, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SAMA, M. P. Laboratory performace of a mass flow sensor for dry edible bean harvesters. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 26, p. 11-20, 2010.

ZHANG, Y.; OKAMURA, S. New function of dielectric properties for density-independent moisture measurement. In: International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, 4., 2001, Weimar. **Anais...** Weimar: MFPA an der Bauhaus-Universität, 2001. p. 111-116.

ZOERB, G. C.; MOORE, G. A.; BURROW R. P. Continuous measurement of grain moisture content during harvest. **Transactions of ASAE**, v. 36. 1993.