

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SEMENTES**



Tese

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR CAPACITIVO DE MEDIÇÃO DA MASSA
ESPECÍFICA DE SEMENTES PARA AUTOMAÇÃO DA MESA DE GRAVIDADE**

Ádamo de Sousa Araújo

Pelotas, 2017

Ádamo de Sousa Araújo

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR CAPACITIVO DE MEDIÇÃO DA MASSA
ESPECÍFICA DE SEMENTES PARA AUTOMAÇÃO DA MESA DE GRAVIDADE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Pelotas, sob orientação do Professor Dr. Francisco Amaral Villela, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, para obtenção do Título de Doutor em Ciências (área do conhecimento: Ciência e Tecnologia de Sementes).

Orientador: Prof. Dr. Francisco Amaral Villela
Coorientador: Prof. Dr. Mario Lepoldo Baudet Labbé

Pelotas, 2017

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

A111d Araújo, Ádamo de Sousa

Desenvolvimento de um sensor capacitivo de medição da massa específica de sementes para automação da mesa de gravidade / Ádamo de Sousa Araújo ; Francisco Amaral Villela, orientador ; Leopoldo Mario Baudet Labbé, coorientador. — Pelotas, 2017.

55 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2017.

1. Mesa densimétrica. 2. Massa específica. 3. Propriedades dielétricas. 4. Permissividade dielétrica. I. Villela, Francisco Amaral, orient. II. Labbé, Leopoldo Mario Baudet, coorient. III. Título.

CDD : 631.521

Ádamo de Sousa Araújo

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR CAPACITIVO DE MEDIÇÃO DA MASSA
ESPECÍFICA DE SEMENTES PARA AUTOMAÇÃO DA MESA DE GRAVIDADE**

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Ciências,
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Faculdade de
Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas

Data da defesa: 01/03/2017

.....
Prof. Dr. Francisco Amaral Villela (Comitê de orientação) Doutor em Fitotecnia pela
Universidade de São Paulo

.....
Dr. Leopoldo Mario Baudet Labbé (Comitê de orientação), PhD. Iowa State University
.

.....
Prof. Dra. Gizele Ingrid Gadotti (Comitê de orientação), Doutora em Ciência e
Tecnologia de Sementes pela Universidade Federal de Pelotas

.....
Prof. Dr. André Pich Brunes, Doutor em Ciência e Tecnologia de Sementes pela
Universidade Federal de Pelotas

.....
Prof. Dr. Alex Leal de Oliveira, Doutor em Ciência e Tecnologia de Sementes pela
Universidade Federal de Pelotas e Professor do Instituto Federal Farroupilha.

Dedico
À minha esposa e filhos.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Leopoldo Mario Baudet Labbé e Francisco Amaral Villela, pela orientação, confiança e incentivo na realização deste trabalho. A Professora Gizele Ingrid Gadotti pelas contribuições, ajuda e inestimada dedicação.

Aos membros da banca examinadora Dr. André Pich Brunet e ao Dr. Alex Leal de Oliveira.

À Universidade Federal de Pelotas, à Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel e à Faculdade de Engenharia Agrícola, e todos aqueles professores que contribuíram de forma positiva no meu desenvolvimento pessoal e de obtenção de novos conhecimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento de experimentos.

Aos amigos e colegas do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes que acompanharam minha jornada acadêmica.

Aos estagiários Igor Dias Leitzke, Anderson Severo da Silva e Augusto Maciel por todo apoio prestado.

Aos meus pais Antônio Carlos Araújo e Maria Elísia de Sousa Araújo pelo amor, força e por fazer o possível e o impossível para me manter no caminho certo.

À minha esposa Carla Araújo e meus filhos Francisco, Antônia e João Araújo pelo amor e por estarem sempre comigo me apoiando.

À todas as pessoas que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Araújo, Ádamo de Sousa. **Desenvolvimento de um sensor capacitivo de medição da massa específica de sementes para automação da mesa de gravidade**, 2017. 43f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

RESUMO: A automação das operações unitárias de beneficiamento de sementes é uma necessidade real para aperfeiçoar o funcionamento, a operação e o ajuste das máquinas. A massa específica das sementes pode apresentar associação com o vigor, pois sementes com problema de enchimento, atacadas por insetos ou até mesmo quebradas, sofrem redução da massa específica, conseqüentemente decréscimo de qualidade fisiológica do lote de sementes. O objetivo do trabalho foi desenvolver um sensor capacitivo para medição da massa específica de sementes e analisar a associação entre a permissividade dielétrica relativa e a qualidade fisiológica de sementes beneficiadas em mesa de gravidade. No experimento empregaram-se sementes de soja e de coentro. Foi utilizado a correlação de Pearson para analisar as variáveis de massa específica (ρ), teor de água (U) e temperatura (T) com a permissividade dielétrica relativa total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz. A correlação de Pearson foi utilizada para análise da associação entre a permissividade relativa e os atributos fisiológicos e físicos das sementes. A permissividade dielétrica relativa, atributos fisiológicos e físicos foram submetidos a análise de variância e, se significativos, as variáveis foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Houve alta correlação entre as variáveis com as permissividades relativas analisadas em quase todas as frequências, contudo, há uma melhora na estabilidade dos dados com ao aumento da frequência. O sensor mostrou-se eficiente para a determinação da massa específica das sementes, conhecendo previamente o teor de água e a temperatura das sementes. Pelo do teste de Tukey a permissividade relativa permitiu o ranqueamento das bicas de descarga, semelhante aos atributos fisiológicos e físicos exceto a emergência. A regressão linear indicou que com aumento da frequência melhora na conformidade de valores de permissividade. O sensor mostrou-se relativamente eficiente para a determinação da massa específica.

Palavras-chave: Mesa densimétrica, massa específica, propriedades dielétricas, permissividade dielétrica.

Araújo, Ádamo de Sousa. **Development of a capacitive sensor to measure the specific gravity of seeds for automation of the gravity table**, 2017. 43p. Thesis (Doctorate) – Graduate Program in Seed Science & Technology. Federal University of Pelotas, Pelotas, RS, Brazil.

ABSTRACT:

The automation of unit operations for seed processing is a real necessity to improve the operation, operation and adjustment of the machines. The specific gravity of the seeds may be associated with vigor, because seeds with problems of filling, attacked by insects or even broken, suffer a reduction of the specific gravity, consequently a decrease in the physiological quality of the seed lot. The objective of this work was to develop a capacitive sensor to measure the specific gravity of seeds and analyze the association between the relative dielectric permittivity and the physiological quality of seeds benefited in a gravity table. In the experiment soybean and coriander seeds were used. Pearson correlation was used to analyze the variables of specific gravity (ρ), water content (U) and temperature (T) with the total relative (ϵ), real (ϵ') and imaginary (ϵ'') In the frequencies of 1 kHz, 10 kHz and 100 kHz. Pearson correlation was used to analyze the association between relative permittivity and the physiological and physical attributes of the seeds. Relative dielectric permissiveness, physiological and physical attributes were submitted to analysis of variance and, if significant, the variables were compared by the Tukey test at 5% probability. There was a high correlation between the variables with the relative permissiveness analyzed at almost all frequencies, however, there is an improvement in the stability of the data with increasing frequency. The sensor was efficient for the determination of the specific gravity of the seeds, previously knowing the water content and the temperature of the seeds. By the Tukey's test the relative permissiveness allowed the rank of discharge nozzles, similar to the physiological and physical attributes except emergency. The linear regression indicated that with increasing frequency, the compliance of permissiveness values improved. The sensor was relatively efficient for determining the specific gravity.

Key-words: Density table, specific gravity, dielectric properties, dielectric permissiveness.

LISTA DE FIGURAS

Artigo 1

Figura 1: Sensor capacitivo constituído por dois cilindros metálicos com diâmetros DB e DA e comprimento L, sendo em amarelo o volume ocupado pelas sementes. 9

Figura 2: Sensor capacitivo cilíndrico fixo em base de PVC expandido. 10

Figura 3: Correlação de Pearson para massa específica, teor de água e temperatura de sementes de soja e permissividades dielétrica total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') na frequência de 1 kHz. 18

Figura 4: Correlação de Pearson para massa específica, teor de água e temperatura de sementes de soja e permissividades dielétrica total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') na frequência de 10 kHz. 19

Figura 5: Correlação de Pearson para massa específica, teor de água e temperatura de sementes de soja e permissividades dielétrica total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') na frequência de 100 kHz. 19

Figura 6: Regressão linear das massas específicas de sementes de soja com as permissividades dielétricas reais nas frequências 1kHz, 10 kHz e 100 kHz. 20

Figura 7: Superfície de resposta do modelo linear que relaciona a massa específica (ρ) e teor de água (U) de sementes de soja com a permissividade dielétrica real (ϵ') na frequência de 100 kHz e a temperatura (T) estabelecida a 24°C. 22

Artigo 2

Figura 8: Esquema do sensor capacitivo cilíndrico. 31

Figura 9: Sensor de cilindros concêntricos desenvolvido com tubos de alumínio e base de PVC expandido 32

Figura 10: Análise de regressão linear entre peso hectolitro (PH) e permissividade dielétrica (E) nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz. 37

LISTA DE TABELAS

Artigo 1

Tabela 1: A correlação de Pearson entre a massa específica (ρ) das sementes de soja e as permissividades dielétrica total ϵ' , permissividade dielétrica real ϵ' e permissividades dielétrica imaginária ϵ'' nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz. 15

Tabela 2: A correlação de Pearson entre a teor de água (U) de sementes de soja e as permissividades dielétrica total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz. 16

Tabela 3: A correlação de Pearson entre a temperatura (T) e as permissividades dielétrica total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz. 17

Artigo 2

Tabela 4: Correlação de Pearson entre as variáveis germinação (G), primeira contagem da germinação (PCG), teste de frio (TF), emergência a campo aos 14 ($E14$) e aos 21 dias ($E21$), peso hectolitro (PH) e as variáveis de permissividade dielétrica (ϵ) nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz. 34

Tabela 5: Germinação (G), primeira contagem da germinação (PCG), teste de frio (TF), emergências a campo ao 14 ($E14$) e aos 21 dias ($E21$) e o peso hectolitro (PH) das sementes de coentro das diferentes frações da mesa de gravidade..... 35

Tabela 6: Permissividade dielétrica (ϵ) nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz da cultivar de coentro..... 36

LISTA DE EQUAÇÕES

Artigo 1

Equação 1: Capacitância em capacitores cilíndricos.....10

Equação 2: Razão entre o sensor carregado e vazio.....11

Equação 3: Conjugado complexo da Permissividade.....12

Equação 4: Modelos estatístico da regressão polinomial do quarto grau.....20

Equação 5: Modelos estatístico da permissividade a 100 kHz polinomial do quarto grau.....21

Artigo 2

Equação 6: Modelos estatístico da regressão polinomial de grau um.....36

Sumário

RESUMO:.....	i
ABSTRACT:	ii
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE EQUAÇÕES	v
INTRODUÇÃO GERAL	1
Artigo 1	5
RESUMO:	5
ABSTRACT:.....	6
INTRODUÇÃO.....	7
MATERIAL E MÉTODOS.....	9
RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
CONCLUSÕES.....	22
REFERÊNCIAS.....	23
Artigo 2.....	26
RESUMO:	26
ABSTRACT:.....	27
INTRODUÇÃO.....	28
MATERIAL E MÉTODOS.....	30
RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS.....	38
CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERENCIAS.....	42

INTRODUÇÃO GERAL

A modernização do campo é uma realidade atual e vem sendo impulsionada cada vez mais, tanto pela competitividade comercial quanto pela profissionalização do agronegócio nacional. A automação das operações agroindustriais relacionadas ao beneficiamento de sementes é um reflexo dessa realidade rural e pode ser entendida como a aplicação de técnicas que utilizam o computador ou máquinas projetadas para a execução de atividades específicas na unidade de beneficiamento de sementes - UBS (ARAÚJO; OLIVEIRA; BAUDET, 2014).

Algumas cadeias produtivas mais organizadas já apresentam partes de seus processos de pós-colheita com algum tipo de automação. Obviamente, a organização do setor produtivo, o volume de recursos envolvidos na cadeia produtiva e a possibilidade de automação das operações são alguns obstáculos para a total expansão da tecnologia.

A automação é uma importante ferramenta que auxilia na operação e gestão das UBSs, assim ganhando muitas aplicações nos processos de beneficiamento e armazenamento, uma vez que traz grandes vantagens aos que utilizam essa tecnologia (ARAÚJO; OLIVEIRA; BAUDET, 2014).

Uma das espécies que mais tem se aproveitado das vantagens trazidas pela automação é a soja (*Glycine max* L. Merrill), uma vez que se trata de uma das culturas mais cultivadas em todo mundo, com grande importância na economia global. O desenvolvimento de novas cultivares está relacionado a novas tecnologias, especialmente aquelas relacionadas à produção de sementes de alta qualidade (PELÚZIO et al., 2008).

A cultura da soja é de grande importância na produção de alimentos, sendo grande fonte de matéria-prima para a indústria e alimentação animal, adaptando-se a diversas condições regionais (EMBRAPA, 2006).

A importância econômica do complexo da soja é bem conhecida, já que o Brasil está entre os principais *players* do negócio de soja. Os dados levantados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, apresentam a grandeza da sojicultura nacional e a sua potencialidade de uso após o processamento, uma vez que são produzidos 5,8 milhões de toneladas de óleo comestível e 23,5 milhões de toneladas de farelo proteico, contribuindo com a cadeia produtiva de carnes, ovos e leite. Também se constitui em alternativa para

a fabricação de biodiesel, combustível com baixa emissão de gases causadores do efeito estufa na atmosfera (BRASIL, 2015).

Diferentemente da organizada produção de sementes de soja e da sua indústria de transformação, temos a produção de sementes de hortaliças e as suas atividades de pós-colheita. A cadeia produtiva de sementes de hortaliças caminha, em passos mais lentos, para a organização desejada.

O coentro (*Coriandrum sativum* L.) é uma espécie de hortaliça amplamente utilizada em diversas regiões do mundo como os Estados Unidos, o Médio Oriente e o Sudoeste da Ásia (RAVI et al., 2007). No Brasil, desempenha um papel social significativo, sendo suas sementes e folhas amplamente utilizadas como condimento (BERTINI et al., 2010). Apesar de seu cultivo ser praticado por tanto na agricultura familiar, quanto empresarial, a área semeada encontra-se em expansão no país (PEREIRA et al., 2005; NASCIMENTO et al., 2006),

O acesso a informações de pesquisa na área de sementes de hortaliças ainda é pouco contemplado, especialmente no caso de sementes de coentro, apesar se tratar de uma cultura de importância sobre o ponto de vista socioeconômico (PEREIRA et al., 2011; PEREIRA et al., 2012).

Segundo Barros Júnior et al. (2004), o coentro é a segunda hortaliça folhosa de importância econômica para o país, ficando atrás apenas da alface. Dessa forma, acarretando uma maior demanda de sementes de alta qualidade para o adequado estabelecimento da cultura no campo.

As propriedades físicas das sementes são parâmetros importantes utilizados para determinar a qualidade e as condições mais favoráveis para o beneficiamento e armazenamento (TRABELSI; KRASZEWSKI; NELSON, 1998). Os conhecimentos das propriedades físicas dos produtos agrícolas são importantes para projetos e operação de equipamentos de beneficiamento e secagem, bem como a adaptação desses equipamentos para melhorar o rendimento e reduzir custo (AFONSO JÚNIOR, 2000).

Uma das propriedades físicas mais importantes para a separação de sementes é a massa específica, que consiste na razão entre a massa e o volume ocupado pelas sementes, podendo ser classificada como massa específica real e massa específica aparente. A diferença é que a massa específica aparente inclui o volume dos espaços vazios existentes entre um grão e outro, enquanto a massa

específica real ou unitária considera apenas o volume ocupado pela massa de grãos, desconsiderando os espaços vazios (MOHSENIN, 1978).

A massa específica é utilizada para o dimensionamento de silos, secadores, depósitos e sistemas de transportes, podendo ser empregada para determinar danos causados por insetos, bem como a deterioração causada por fungos de armazenamento (SILVA, 2008). Essa propriedade está relacionada ao vigor de sementes, uma vez que, sementes com maior massa específica tendem a expressar maior vigor do que sementes de menor massa específica. (PESKE; BAUDET, 2012).

O teor de água e massa específica são fatores importantes que afetam as operações de colheita, secagem e armazenamento de biomassa. Durante a colheita, as sementes podem sofrer danos se estiverem com teor de água elevado, diminuindo sua qualidade fisiológica. Além disso, as sementes danificadas são mais susceptíveis à infecção por fungos, levando à deterioração durante o armazenamento (NELSON; TRABELSI, 2004).

A medição rápida e com precisão do teor de água de sementes influencia a colheita, secagem, beneficiamento, armazenamento e comercialização. No entanto, o método padrão de determinação do teor de água é o da estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, sendo necessário o período de tempo de 24h para determinar o teor de água (BERBERT et al., 2004).

O conhecimento das propriedades dielétricas de grãos e sementes é vital em várias áreas da ciência e engenharia, tanto na pesquisa básica, quanto na aplicada (BARTTLEY; NELSON, 2002). Na agricultura, as propriedades dielétricas de grãos têm sido amplamente utilizadas para determinar o teor de água dos grãos devido à rápida detecção da umidade. O grau de umidade de detecção baseia-se na correlação entre as propriedades dielétricas dos grãos e a quantidade de água presente. A maioria dos produtos agrícolas e alimentares são higroscópicos, e há grande diferença nas propriedades dielétricas da matéria seca e da água (NELSON; BARTTLEY, 2000).

Nelson e Trabelsi (2004) mostraram que as propriedades dielétricas de sementes e grãos de trigo, soja e milho são altamente dependentes da frequência do dispositivo de medição, teor de água, massa específica e temperatura. O teor de água, massa específica e frequência são os parâmetros que afetam diretamente a permissividade dielétrica relativa, sendo o teor de água o parâmetro mais

importante que contribui para a variação de permissividade (SACILIK; COLAK, 2010).

A permissividade dielétrica é um número complexo, que consiste numa propriedade que os materiais têm de se relacionar ao serem submetidos a um campo eletromagnético (TRABELSI et al., 1998). A permissividade dielétrica real é uma das propriedades fundamentais da matéria e está relacionada à capacidade que o material dielétrico tem de armazenar energia, no presente caso, uma amostra de sementes. Já a componente imaginária da permissividade dielétrica está relacionada com a perda pela dissipação da energia que o dielétrico apresenta (NELSON, 2015).

Tento em vista a potencialidade de automação das operações de beneficiamento para diversas culturas e as propriedades físicas de separação de sementes, foi realizado o presente trabalho com o objetivo de desenvolver um sensor capacitivo para sementes e analisar as propriedades de permissividade dielétrica em relação aos atributos fisiológicos e físicos de sementes

Artigo 1

Desenvolvimento de um sensor capacitivo para massa específica de sementes de soja

RESUMO:

A massa específica de sementes é utilizada como indicativo de vigor, pois sementes com enchimento incompleto, atacada por pragas ou até mesmo mecanicamente danificadas, apresentam redução da massa específica, assim causando diminuição da qualidade fisiológica do lote de sementes. A mesa de gravidade utiliza como princípio de separação a diferença de massa específica. O sensor capacitivo utiliza a semente como dielétrico, sendo que a massa específica, teor de água e temperatura das sementes influenciam na resposta do sensor. Sendo assim, objetivou-se desenvolver um sensor capacitivo que possa ser instalado na mesa de gravidade a fim de medir a massa específica de sementes. Foram utilizadas sementes de soja das cultivares Potência RR e Brasmax RR, que tiveram seus resultados analisados por meio da correlação de Pearson para a análise de resultados individuais e entre todos, nos critérios da massa específica (ρ), teor de água (U) e temperatura (T) com a permissividade dielétrica total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz. Para a regressão, foi utilizado um modelo que relaciona a massa específica (ρ), teor de água (U) e temperatura (T) com a permissividade dielétrica real na frequência de 100 kHz. Houve alta correlação entre as variáveis com as permissividades analisada em quase todas as frequências. Observou-se maior estabilidade dos dados em frequências mais elevadas. O sensor mostrou-se eficiente para a determinação da massa específica, mas ainda apresenta a dependência de conhecimento prévio do teor de água e da temperatura das sementes de soja.

Palavras-chave: mesa de gravidade, permissividade dielétrica, automação.

Development of a capacitive sensor for specific gravity of soybean seeds

ABSTRACT:

The specific seed mass is used as indicative of vigor, because seeds with incomplete filling, attacked by pests or even mechanically damaged, present a reduction of the specific gravity, thus causing a decrease in the physiological quality of the seed lot. The gravity table uses as separation principle the specific gravity difference. The capacitive sensor uses the seed as a dielectric, with the specific gravity, water content and temperature of the seeds influencing the sensor response. Thus, the objective was to develop a capacitive sensor that can be installed on the gravity table in order to measure the specific gravity of seeds. Soybean seeds of the cultivars Potência RR and Brasmax RR were used, whose results were analyzed by Pearson correlation for the analysis of individual results and among all, in the criteria of the specific gravity (ρ), water content (U) and Temperature (T) with the total (ϵ), real (ϵ') and imaginary (ϵ'') dielectric permittivity at the frequencies of 1 kHz, 10 kHz and 100 kHz. For the regression, a model was used that relates the specific gravity (ρ), water content (U) and temperature (T) with the real dielectric permittivity at 100 kHz frequency. There was a high correlation between the variables with the permittiveness analyzed in almost all frequencies. Higher data stability was observed at higher frequencies. The sensor was efficient for the determination of the specific gravity, but still presents the prior knowledge dependence of the water content and the temperature of the soybean seeds.

Key-words: gravity table, dielectric permittiveness, automation.

INTRODUÇÃO

A área de cultivo da soja (*Glycine max* L. Merrill) está em plena expansão e com ela a maior necessidade de incrementar produtividade, a fim de atender a demanda global de alimentos. Além disso, a soja é utilizada como matéria prima para óleos e fabricação de ração, assim, seu aumento na produtividade se torna necessário. Para a safra 2016/2017 a produção estimada, foi de 104 milhões de toneladas (CONAB, 2016).

Para atender as demandas alimentares e energéticas, os processos associados as operações de pós-colheita necessitam de algumas melhorias. O conhecimento sobre os princípios físicos, dentre eles a massa específica, contribui para a melhoria dos equipamentos de beneficiamento de sementes, aumentando a sua eficiência na separação de lotes.

A massa específica (massa por unidade de volume ocupado por um sólido granulométrico) tem uma relação positiva com a concentração energética em grãos e sementes (WOODBURY; WEINHEIMER, 1965). A massa específica de um lote de sementes pode variar em função de diferentes fatores como ataque de insetos, doenças, maturação e precipitação pluvial próximo a colheita. Sementes de baixa massa específica possuem baixo vigor ou até mesmo podem não ser viáveis (PESKE; BAUDET, 2012). O peso hectolítro é a maneira mais utilizada para determinar a massa específica. A balança hectolítrica é o equipamento padrão para medição da massa específica de sementes. Contudo, não há possibilidade de se interligar a sistemas de monitoramento e controle eletrônicos.-

As propriedades físicas de grãos e sementes, tais como massa específica, teor de água, temperatura e composição química são parâmetros importantes, e muitas vezes utilizados para determinar a qualidade e as condições favoráveis para o beneficiamento e armazenamento seguro. Estas propriedades podem ser determinadas de forma indireta, rápida e não destrutiva por meio de medições da permissividade dielétrica. Com a crescente demanda por monitoramento e controle *online* em indústrias altamente automatizadas, a aplicação deste conceito seria fornecer uma solução adequada para a medição dessas propriedades (TRABELSI; KRASZEWSKI; NELSON, 1999).

A medição rápida, exata e precisa do teor de água e massa específica de grãos e sementes é de grande importância nas operações de colheita, secagem,

armazenamento, comercialização e beneficiamento de produtos agrícolas. No entanto, a determinação do teor de água utilizando-se método-padrão, como os da estufa com convecção gravitacional ou forçada é muito demorada, podendo, em alguns casos, se estender por até 72 h. Esse tipo de medição está se tornando satisfatória apenas para um número limitado de operações de rotina em unidades de manuseio de grãos (BERBERT et al., 2004).

As propriedades dielétricas ou permissividade de materiais agrícolas e produtos alimentares são bons parâmetros para determinar a forma como eles interagem com um campo elétrico. As frequências de microondas, assim como as propriedades dielétricas determinam a taxa de aquecimento que os materiais sofrem ao serem submetidos a intensos campos elétricos nessas frequências (SACILIK; COLAK, 2010).

A permissividade dielétrica complexa, representa a interação matéria-onda, podendo ser entendida como a assinatura elétrica de um dado material. A parte real, é a constante dielétrica, indicada como a capacidade de um material armazenar energia do campo elétrico proveniente de uma onda eletromagnética; e a parte imaginária, é o fator de perda dielétrica, que indica a capacidade de um material para dissipar a energia. Ambas as entidades são dependentes de frequência, massa específica, teor de água, temperatura e composição química do material (NELSON, 2015).

A maioria dos alimentos e produtos agrícolas são meios heterogêneos constituídos por componentes com diferentes comportamentos dielétricos, e, portanto, a sua permissividade complexa é a permissividade eficaz da mistura. Dependendo da faixa de frequência, outros componentes podem ter um efeito não negligenciável e, portanto, deve ser integrado a um modelo de mistura. Não há um modelo analítico físico que se correlaciona de forma adequada a permissividade efetiva e as propriedades físicas de um tal meio. No entanto, uma melhor compreensão de tais meios pode ser alcançada através da abordagem experimental (TRABELSI; KRASZEWSKI; NELSON, 1999).

Assim, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sensor capacitivo para medir a massa específica em sementes de soja.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório Didático de Beneficiamento de Sementes da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel – Universidade Federal de Pelotas, RS. Foi utilizada sementes de soja, oriundas da safra 2015/2016 com massa específica de 700kg m^{-3} , umidade inicial em média de 11%.

Nos testes foi utilizada uma mistura de sementes de soja das cultivares, para se obter valores médios para essa espécie.

Um sensor capacitivo foi projetado para que o volume de sementes no seu interior fosse de aproximadamente 250mL, tendo em vista o volume utilizado convencionalmente em balança de peso hectolitro. Para uma melhor acomodação das sementes durante o teste, o sensor foi desenvolvido em estrutura cilíndrica, limitado internamente por dois cilindros metálicos de diâmetros diferentes, porém, sobrepostos, sendo que as sementes eram inseridas entre os dois cilindros como indicado na Figura 1.

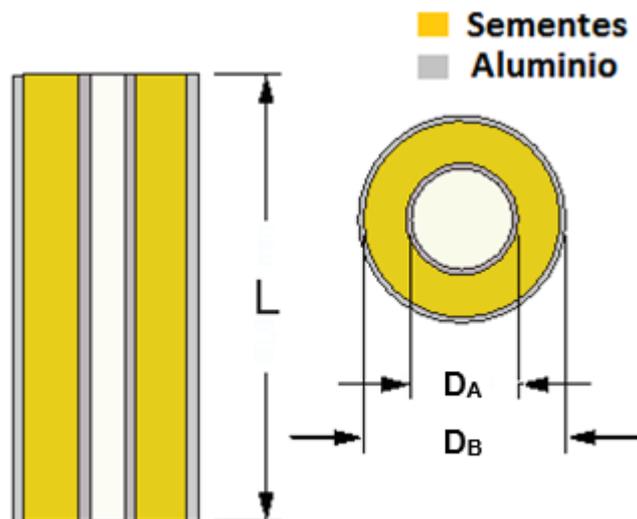


Figura 1: Sensor capacitivo constituído por dois cilindros metálicos com diâmetros D_B e D_A e comprimento L , sendo em amarelo o volume ocupado pelas sementes.

Para obter a capacitância do sensor, foi utilizada uma adaptação da equação da estrutura da arquitetura de um capacitor cilíndrico segundo a Lei de Gauss (Equação 1).

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot L \cdot \ln\left(\frac{D_B}{D_A}\right) (F) \text{ Equação 1}$$

Onde,

ε_r – Permissividade relativa do material em estudo

ε_0 – Permissividade do vácuo $\sim 8,54 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$

L – Altura dos cilindros

D_A – Diâmetro externo do cilindro interno (A)

D_B – Diâmetro interno do cilindro interno (B)

O material utilizado para confecção do sensor foi o alumínio 7075. Para fixação dos cilindros foi montada uma base de PVC expandido, contendo uma permissividade dielétrica de 3 a 8. Os cilindros foram fixados nessa base por encaixe feito na estrutura de PVC e montados conforme a Figura 2.

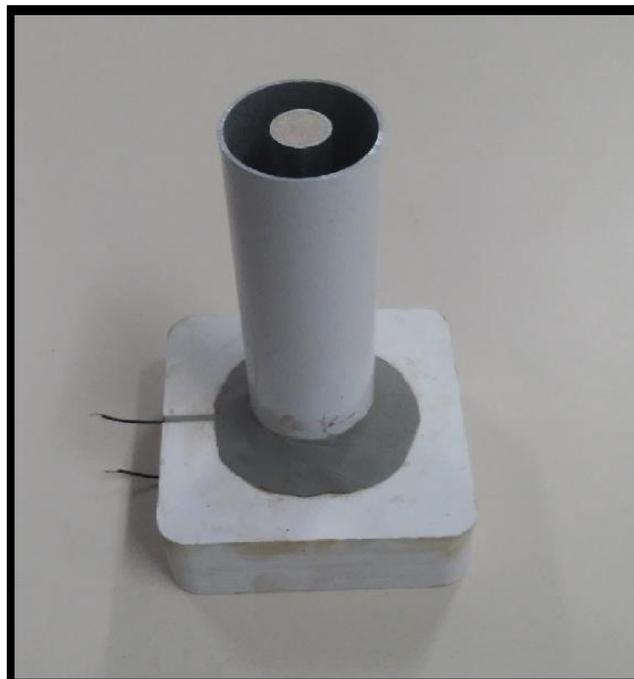


Figura 2: Sensor capacitivo cilíndrico fixo em base de PVC expandido.

Para realizar as aferições, foi acoplado ao sensor um medidor de resistência, capacitância e indutância - LCR, com capacidade de analisar a impedância elétrica,

sendo essa a alteração no fluxo magnético, a leitura dos parâmetros de resistores, indutores e capacitores em diversas frequências.

O LCR utilizado foi o modelo U1731C da *Keysigth Technologies*®. Que realiza as medições em cinco frequências diferentes, a saber: 100Hz, 120 Hz, 1k Hz, 10k Hz e 100kHz.

Neste trabalho foram utilizadas apenas as três maiores frequências. Os estudos preliminares apontaram que nas frequências mais baixas existe uma grande instabilidade, resultado dos baixos valores de capacitância gerados pelo sensor.

Para obtenção da temperatura e umidade relativa do ar foi utilizado um termohigrômetro da marca *Instrutherm*®, que realizava na mesma ponteira as medições das duas grandezas, sendo que as acurácias para a temperatura eram de 0,5 °C e de 1,5% para a umidade relativa do ar.

Para obter a permissividade do material se abastece o sensor com sementes no seu interior (Figura 1), retirando o excesso, se obtendo a medida de Capacitância cheio (C_{cheio}). Logo após realiza-se a medida com o sensor vazio (C_{vazio}). A razão entre a medida do sensor abastecido e do sensor vazio é diretamente a permissividade causada pelo material, pois todos os outros fatores estruturais (ϵ_0, L, D_B e D_A) do sensor permanecem iguais, anulando o seu efeito, restando apenas a permissividade dielétrica total Equação 2.

$$\frac{C_{cheio} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot L \cdot \ln\left(\frac{D_B}{D_A}\right)}{C_{vazio} = \epsilon_0 \cdot L \cdot \ln\left(\frac{D_B}{D_A}\right)} = \epsilon_r \text{ Equação 2}$$

$$C_{che}$$

Onde,

C_{cheio} – Capacitância do sensor com sementes no seu interior

C_{vazio} – Capacitância do sensor vazio

ϵ_r – Permissividade relativa do material em estudo

ϵ_0 – Permissividade do vácuo $\sim 8,54 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$

L – Altura dos cilindros

D_A – Diâmetro externo do cilindro interno (A)

D_B – Diâmetro interno do cilindro interno (B)

A outra variável medida foi o fator de perda (D), que representa a energia dissipada pelo material dielétrico, sendo essa considera uma perda (Equação 3).

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' \quad D = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad \text{Equação 3}$$

Onde,

ε – Permissividade dielétrica total

ε' – Permissividade dielétrica real

j – Unidade imaginária ($\sqrt{-1}$)

ε'' – Permissividade dielétrica complexa

D – fator de perda

Para realizar a análise dos efeitos da massa específica, teor de água e temperatura na permissividade dielétrica do sensor, utilizaram-se cinco níveis de massa específica, seis níveis de teor de água e seis níveis de temperatura.

Para pode gerar as amostras com diversos níveis de massa específica, foram selecionadas sementes diretamente separadas pela massa específica na da mesa de gravidade. Os lotes adquiridos para o teste apresentam alta qualidade, e apresentando massa específica muito próximas. Para a obtenção de diferentes níveis de massa específica, separaram-se amostras dos lotes para servir como ponto médio e buscaram-se metodologias para obter dois níveis por redução e dois níveis por aumento

Desenvolveu-se uma metodologia para o aumento dos níveis de massa específica das amostras. Aumentou-se a massa de sementes dentro do sensor, mantendo o volume constante, assim, o aumento da massa específica seria diretamente proporcional ao incremento da massa. Para isso, utilizou-se um cilindro auxiliar com mesmo diâmetro do sensor, colocado acima do sensor como extensão do cilindro externo.

As amostras de sementes foram inseridas por meio da extensão do cilindro auxiliar e comprimidas com o auxílio de cilindro fechado com diâmetro menor que o cilindro auxiliar.

No instante em que o abastecimento do sensor era finalizado, o cilindro auxiliar era retirado e, para nivelar as sementes no compartimento do sensor, o analista passava uma régua em sentido perpendicular à entrada do sensor.

Para garantir que essa compressão fosse constante, foi realizado esse procedimento diversas vezes e ao final de cada procedimento, foi pesado o sensor abastecido em balança analítica, previamente tarada, para obter a massa da amostra colocada dentro do sensor. Posteriormente, separaram-se as amostras com massas similares para obter amostras com faixas de massa específica maiores do que a amostra média.

Para redução da massa específica, misturaram-se as amostras de soja com uma quantidade pré-estabelecida de grânulos de poliestireno expandido (isopor), com diâmetro de aproximadamente 6,5 mm. Esse diâmetro foi utilizado por ser o diâmetro médio da semente de soja padronizada em peneira. Assim, ao substituir as sementes por grânulos de poliestireno expandido, esses passaram a ocupar um volume similar ao da semente. A massa do grânulo de poliestireno expandido é desprezível se comparada à massa de uma semente de soja.

A permissividade elétrica relativa dos grânulos de poliestireno, no intervalo entre 1 kHz e 1 GHz, é igual a 1,017. Este valor, é muito semelhante à permissividade relativa do ar, $\epsilon'_{ar} = 1,0006$ (KRAUS; CARVER, 1973).

O poliestireno é também um material que provoca dissipação de energia extremamente reduzida da onda eletromagnética, apresentando fator de perda dielétrica $\epsilon'' = 0,0001$ (BERBERT et al., 2004). Os grânulos de poliestireno expandido alteram apenas a massa colocada dentro do sensor, mantendo as outras propriedades inalteradas, assim reduzindo a massa específica da amostra.

Na obtenção dos teores de água, foram utilizadas amostras com massa específica aproximadamente constante. O teor de água da amostra média, foi de 11% (b.u.). Obtido pelo método da estufa, a 105°C (BRASIL, 2009). A partir desse teor de água, utilizaram-se duas metodologias para redução e aumento desses níveis.

A redução foi obtida em um secador de amostra, sendo colocadas diversas amostras e retiradas em intervalos de tempo pré-definidos por testes preliminares. Esse procedimento possibilitou a obtenção de três níveis abaixo do valor inicial: 8%, 9% e 10% (b.u.). Cada amostra foi colocada em um dessecador para alcançar

equilíbrio com a temperatura ambiente. Logo após, realizava-se a medição pelo sensor e retirava-se amostras para a determinação do teor de água.

O acréscimo do teor de água foi obtido colocando as amostras, com o teor de água inicial de 11% (b.u.), em estufa a 35°C e em ambiente saturado para elevar a umidade relativa do ar. Com essa temperatura mais elevada que a temperatura ambiente média aumentou-se a velocidade de absorção de água pelas sementes. As sementes por serem higroscópicas tendem a atingir o equilíbrio higroscópico com o teor de água e a umidade relativa do ar. Assim, com a umidade relativa do ar próxima a 100%, as sementes aumentam seus teores de água. Após isso, as amostras foram colocadas em dessecador para equilibrar-se com a temperatura ambiente. Esse procedimento, permitiu a obtenção de dois níveis de teor de água, 12 e 13% (b.u.) acima do valor inicial. O procedimento de determinação da umidade final foi semelhante ao citado anteriormente.

Os seis níveis de temperatura foram obtidos com procedimento semelhante ao realizado para o teor de água. Mantendo no laboratório a temperatura constante de aproximadamente 21°C. Foi realizado o experimento utilizando esse valor como referência.

A redução da temperatura foi obtida colocando as amostras em um refrigerador e monitorando a temperatura por meio do termohigrômetro colocado no interior da amostra. A primeira faixa conseguiu-se deixando a amostra por cinco minutos dentro do refrigerador. Logo após, a amostra foi retirada, inserida no sensor e realizada a medição. A segunda faixa inferior obteve-se deixando a amostra pelo tempo de 10 minutos, realizando mesmo procedimento de medição anterior.

O aumento da temperatura foi alcançado empregando um secador de amostras, onde as amostras foram colocadas e mantidas por intervalos de tempo pré-definidos em testes preliminares. A amostra foi medida com o termohigrômetro e em seguida com o sensor capacitivo. Utilizaram-se três níveis de temperatura acima da temperatura ambiente: 30, 40 e 50°C.

Para análise estatística foram utilizadas três repetições para cada níveis de frequência analisado. Os fatores analisados foram: permissividade dielétrica total (ϵ), permissividade dielétrica real (ϵ') e permissividade dielétrica imaginária (ϵ''), em relação à massa específica (ρ), e teor de água (U) e temperatura (T) de sementes. Todos os fatores foram medidos em três frequências (1, 10 e 100 kHz).

Foram utilizados testes de correlação múltipla e regressão linear múltipla por meio de uma superfície de resposta.

Após a análise de dados foi determinado um modelo estatístico que descreve essa propriedade física e validado por meio de correlação linear de Pearson.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em testes preliminares, com sementes de soja de diferentes tamanhos, não foram encontradas diferenças (dados não apresentados). Este resultado é importante, visto que o sensor poderá ser utilizado em equipamentos que possuam diferentes tamanhos de semente sem que isso interfira na sua análise. Isso discorda com o Tal et al (2017) com biomassa, pois a relação entre a quantidade de ar e material não se alteram nos diferentes tamanhos de sementes.

O resultado da análise de correlação para massa específica (ρ) demonstraram que houve uma alta correlação com a permissividade dielétrica total (ϵ), a permissividade dielétrica real (ϵ') e a permissividade dielétrica imaginária (ϵ''). Essa alta correlação mostrou-se em todas as frequências analisadas, assim, não havendo diferença entre as frequências. Todos os valores de correlação foram significativos (Tabela 1).

Tabela 1: A correlação de Pearson entre a massa específica (ρ) das sementes de soja e as permissividades dielétrica total (ϵ), permissividade dielétrica real (ϵ') e permissividades dielétrica imaginária (ϵ'') nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz.

	1 kHz			10 kHz			100 kHz			ρ (kg/m ³)	
	ϵ	ϵ'	ϵ''	ϵ	ϵ'	ϵ''	ϵ	ϵ'	ϵ''		
1 kHz	ϵ	-	1,00 *	0,92 *	0,97 *	0,97 *	0,96 *	0,95 *	0,95 *	0,96 *	0,93 *
	ϵ'		-	0,93 *	0,97 *	0,97 *	0,97 *	0,95 *	0,95 *	0,96 *	0,92 *
	ϵ''			-	0,86 *	0,87 *	0,93 *	0,84 *	0,84 *	0,84 *	0,85 *
10 kHz	ϵ				-	1,00 *	0,94 *	0,99 *	0,99 *	0,99 *	0,93 *
	ϵ'					-	0,95 *	0,99 *	0,99 *	0,99 *	0,94 *
	ϵ''						-	0,91 *	0,91 *	0,92 *	0,94 *
100 kHz	ϵ							-	1,00 *	0,98 *	0,90 *
	ϵ'								-	0,98 *	0,90 *
	ϵ''									-	0,90 *

^{ns} - Não significativo; * Significativo a 0,05%; ** Significativo a 0,01%; ϵ : Permissividade dielétrica total; ϵ' : Permissividade dielétrica real; ϵ'' : Permissividade dielétrica imaginária.

Os resultados da análise de correlação para o teor de água (U) das sementes de soja indicaram que ocorreu uma elevada correlação com a permissividade dielétrica total (ϵ), a permissividade dielétrica real (ϵ') e a permissividade dielétrica imaginária (ϵ''). Essa alta correlação mostrou-se significativas nas frequências de 10 kHz e 100 kHz. Apenas na frequência de 1 kHz para permissividade dielétrica imaginária (ϵ'') que não foi significativo (Tabela 2). Esse resultado pode-se atribuir a instabilidade que há na medição do fator de dissipação em frequências menores. Isso significa que, quanto maior o teor de água das amostras, maior a permissividade dielétrica total, real e imaginária, possibilitando uma alta associação entre esses fatores.

Tabela 2: A correlação de Pearson entre a teor de água (U) de sementes de soja e as permissividades dielétrica total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz.

		1 kHz			10 kHz			100 kHz			U(%)
		ϵ	ϵ'	ϵ''	ϵ	ϵ'	ϵ''	ϵ	ϵ'	ϵ''	
1 kHz	ϵ	-	1,00 **	0,35 ns	0,99 **	0,99 **	0,90 **	0,97 **	0,98 **	0,99 **	0,99 **
	ϵ'		-	0,36 ns	0,99 **	0,99 **	0,90 **	0,97 **	0,97 **	0,99 **	0,99 **
	ϵ''			-	0,26 ns	0,27 ns	0,62 ns	0,19 ns	0,19 ns	0,25 ns	0,27 ns
10 kHz	ϵ				-	0,27 **	0,85 **	0,99 **	0,99 **	1,00 **	0,99 **
	ϵ'					-	0,86 **	0,99 **	0,99 **	1,00 **	0,99 **
	ϵ''						-	0,78 **	0,79 **	0,85 **	0,84 **
100 kHz	ϵ							-	1,00	0,99 **	0,99 **
	ϵ'								-	0,99 **	0,99 **
	ϵ''									-	0,99 **

ns - Não significativo; * Significativo a 0,05%; ** Significativo a 0,01%; ϵ : Permissividade dielétrica total; ϵ' : Permissividade dielétrica real; ϵ'' : Permissividade dielétrica imaginária

Na análise de correlação de Pearson para a temperatura (T) da massa de sementes de soja, houve correlação positiva com a permissividade dielétrica total (ϵ) e a permissividade real (ϵ') e uma alta correlação positiva para permissividade imaginária (ϵ''), ambas correlações positivas para as frequências de 1 e 10 kHz. Na frequência de 100 kHz, houve correlação negativa entre as todas as permissividades dielétricas e a temperatura (Tabela 3). Essa correlação negativa indica a interferência da temperatura em frequências mais altas. Para permissividade dielétrica imaginária, na frequência de 1 kHz, a maioria dos valores foram não significativos, possivelmente pela instabilidade das leituras em baixas

frequências. Tal et al (2017), Lawrence et al (2001) e Nelson (1991) encontraram que as propriedades dielétricas também dependem das frequências do campo elétrico, temperatura, massa específica e estrutura do material.

Tabela 3: A correlação de Pearson entre a temperatura (T) e as permissividades dielétrica total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz.

	1 kHz			10 kHz			100 kHz			T(°C)	
	ϵ	ϵ'	ϵ''	ϵ	ϵ'	ϵ''	ϵ	ϵ'	ϵ''		
1 kHz	ϵ	-	1 **	0,01 ns	0,98 **	0,98 **	-0,22 ns	0,92 *	0,93 *	0,73 **	0,72 **
	ϵ'		-	0,02 ns	0,98 **	0,98 **	-0,22 ns	0,92 *	0,93 *	0,73 **	0,72 **
	ϵ''			-	-0,1 ns	-0,14 ns	0,7 *	-0,25 ns	-0,2 ns	0,3 ns	-0,42 ns
10 kHz	ϵ				-	1 **	-0,41 ns	0,98 *	0,98 *	0,58 *	0,85 **
	ϵ'					-	-0,4 ns	0,98 *	0,98 *	0,58 *	0,85 **
	ϵ''						-	-0,55 *	-0,5 **	0,35 ns	-0,79 **
100 kHz	ϵ							-	1 *	0,43 ns	0,93 **
	ϵ'								-	0,44 ns	0,92 **
	ϵ''									-	0,09 ns

ns - Não significativo; * Significativo a 0,05%; ** Significativo a 0,01%; ϵ : Permissividade dielétrica total; ϵ' : Permissividade dielétrica real; ϵ'' : Permissividade dielétrica imaginária

Analisando os dados da Tabela 3 verifica-se a alta correlação da massa específica (ρ), teor de água (U) e a temperatura (T) das sementes para quase todas as permissividades dielétricas e frequências analisadas, correlacionando-se individualmente cada uma.

Nas Figuras 3, 4 e 5, encontram-se a interação das variáveis analisadas com as variáveis de saída para cada frequência. Para massa específica (ρ), ocorreu uma tendência de crescimento das permissividades dielétricas com o aumento da frequência. Para frequência de 10 kHz, a permissividade dielétrica imaginária (ϵ'') teve uma correlação negativa, e voltando a ser positiva com aumento da frequência para de 100 kHz (Figura 3). O teor de água (U) das sementes teve uma alta correlação com a permissividade dielétrica imaginária (ϵ'') e essa correlação aumentou conforme a elevação da frequência (Figura 4), como já encontrado por Tan et al. (2017), Kim et al. (2006), Nelson (1991 e 2006) e Ramasamy e Moghtaderi (2010).

Esse aumento pode ser explicado devido a (ϵ'') e ao fator de dissipação (D), que se relaciona com a quantidade de energia que o dielétrico dissipa, sendo que esses valores são mais influenciados pela água do que propriamente pela semente, com o aumento do teor de água das sementes, aumento da frequência a o aumento da (ϵ''). Já para a (ϵ) e a (ϵ') se manteve praticamente constante com aumento da frequência. Singh et al. (2017) ao analisar capacitância em trigo com vários teores de água e frequência, observaram correlação, mesmo com altos teores de água e baixas frequências. Os mesmos autores corroboram com os resultados desse trabalho, no qual o teor de água e as frequências possuem correlação e afirmam que baixas frequências são melhores para a leitura de umidade em grãos de trigo. Esses autores trabalharam com frequências de 0,5 a 1000 kHz, portanto as frequências nas quais trabalhamos são consideradas baixas.

Para a temperatura à um aumento para Permissividade total (ϵ') e imaginária (ϵ'') com aumento da frequência com comportamento parecido com a massa específica. Também é visível constatar que a participação do teor de água das sementes maior do que a contribuição da massa específica e da temperatura.

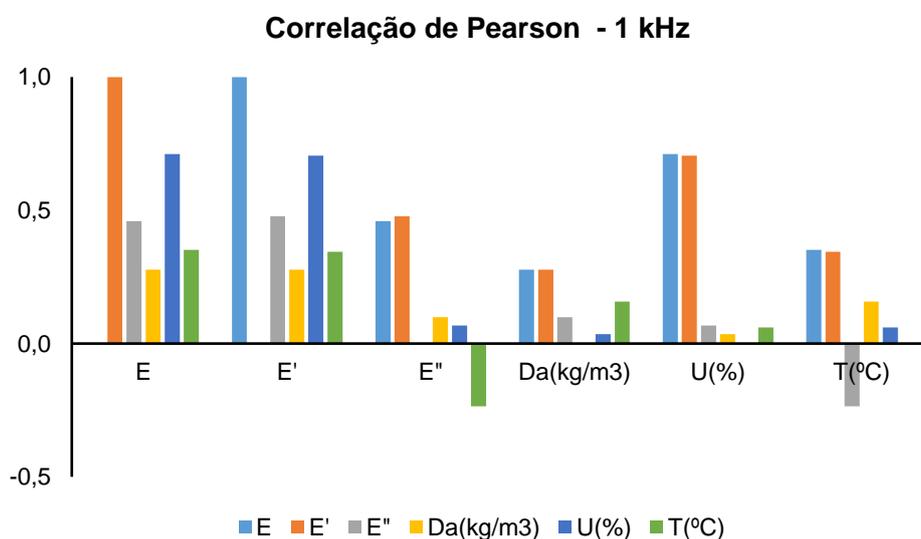


Figura 3: Correlação de Pearson para massa específica, teor de água e temperatura de sementes de soja e permissividades dielétrica total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') na frequência de 1 kHz.

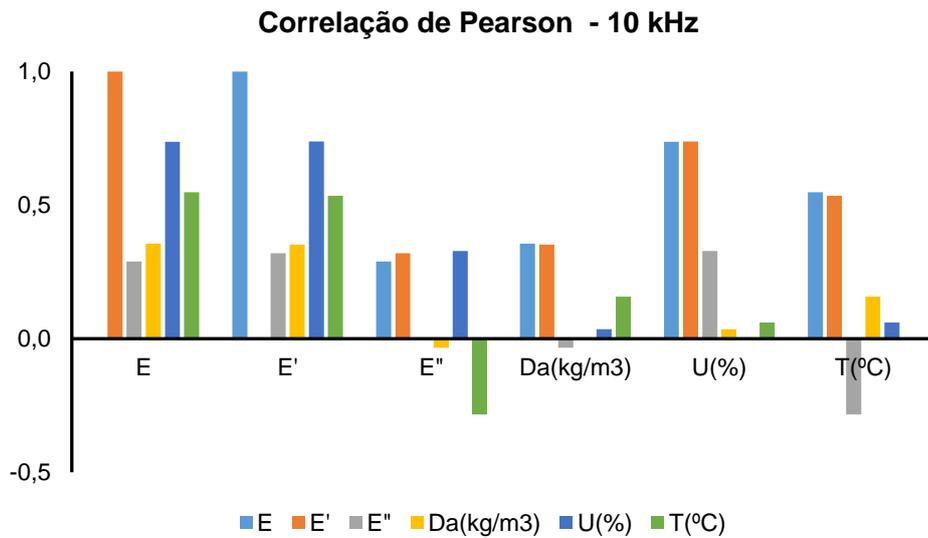


Figura 4: Correlação de Pearson para massa específica, teor de água e temperatura de sementes de soja e permissividades dielétrica total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') na frequência de 10 kHz.

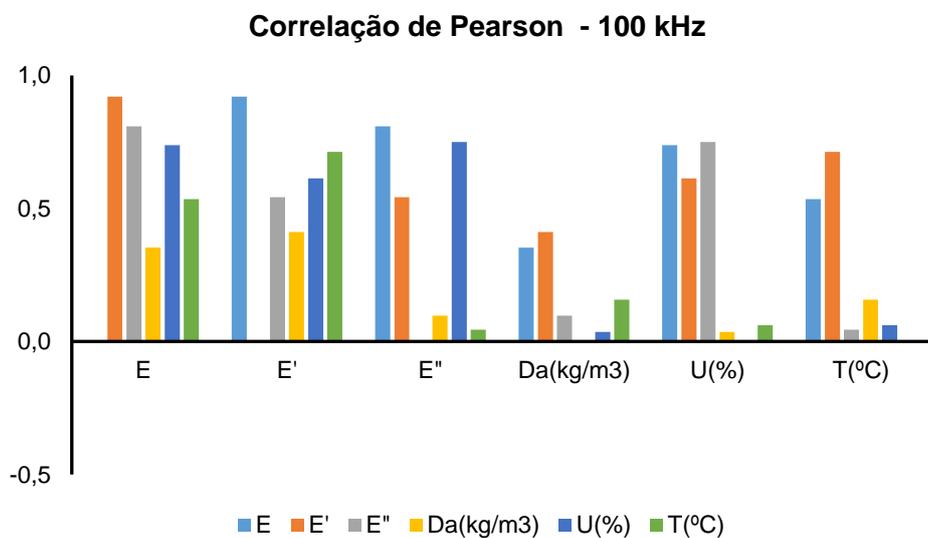


Figura 5: Correlação de Pearson para massa específica, teor de água e temperatura de sementes de soja e permissividades dielétrica total (ϵ), real (ϵ') e imaginária (ϵ'') na frequência de 100 kHz.

Esses dados corroboram com vários autores, como Kim et al. (2003); Nelson (2005); Wild e Haedicke (2005); Jones et al. (2006) e Kumhala, et al. (2009), ao descreverem as propriedades dielétricas como dependente da frequência, teor de água, massa específica, da temperatura, da composição química e do permanente dipolo formando pela água e os componentes. Nesse estudo, a composição química

foi parcialmente controlada, pois se trabalhou apenas com sementes de apenas uma espécie, a soja.

Analisando os dados da regressão linear (Figura 6), ao se fixar o teor de água das amostras e temperatura, verificou-se que há maior linearidade e estabilidade dos dados nos resultados para massa específica na frequência de 100 kHz, que se apresentou como mais adequada para o sensor em desenvolvimento.

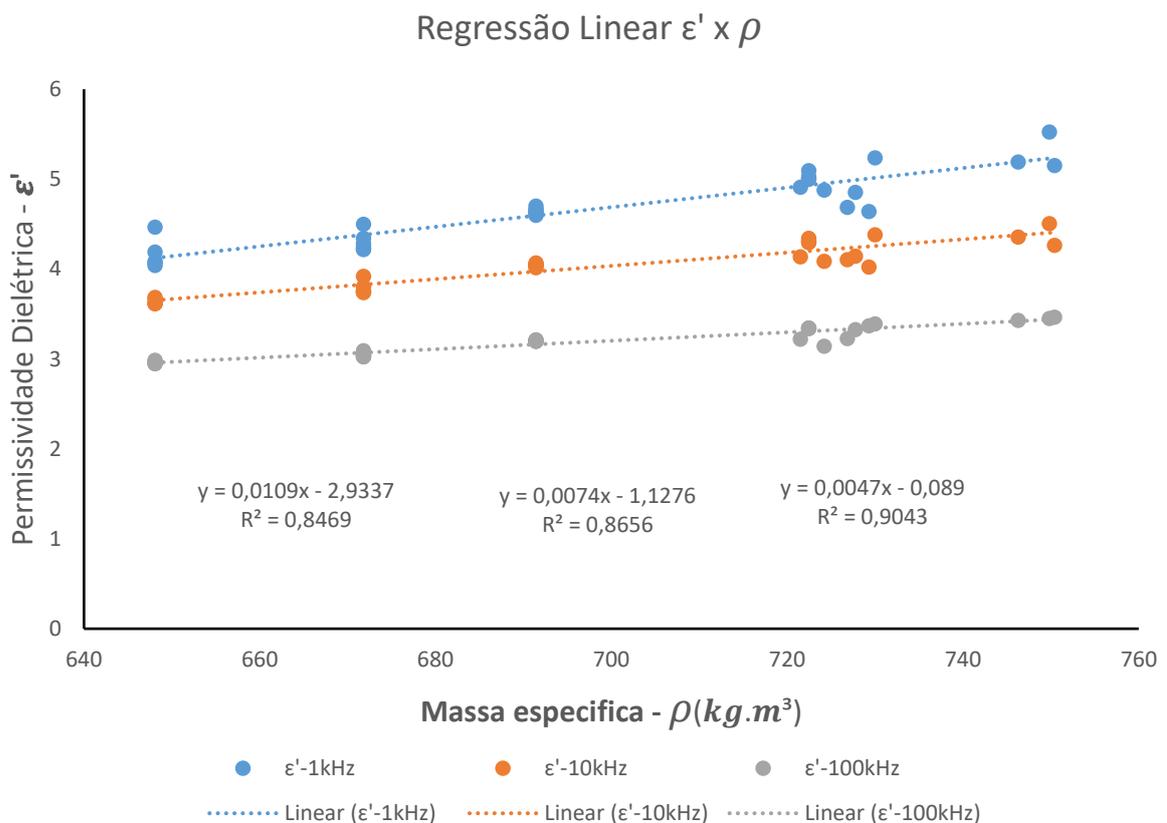


Figura 6: Regressão linear das massas específicas de sementes de soja com as permissividades dielétricas reais nas frequências 1kHz, 10 kHz e 100 kHz.

Por fim, se determinou-se um modelo estatístico utilizado para descrever a permissividade dielétrica real em relação à massa específica, teor de água e temperatura, sendo estes dependentes. Assim, o modelo obtido foi um polinomial, onde a massa específica e o teor de água das sementes tiveram um comportamento linear e a temperatura um comportamento quadrático, na frequência de 100 kHz conforme demonstrada na Equação 4.

$$E'_{100\text{ kHz}} \sim 1 + D_a \cdot U + D_a \cdot T + U \cdot T + T^2 \text{ (Equação 4)}$$

Esse modelo foi validado pela análise de vários modelos, sendo verificado que ele melhor descrevia a tendência dos dados, nas condições avaliadas, devido a maior coeficiente de correlação (Equação 5).

Para a variável resposta com superfície de resposta, optou-se por utilizar a permissividade dielétrica real (ϵ'), já que a mesma atenua o efeito do teor de água que está relacionado à permissividade dielétrica imaginária (ϵ''). Assim, a permissividade dielétrica real (ϵ') é o componente que não sofre perda por dissipação, tendo uma resposta com menos interferência do teor de água (U).

Com a regressão linear obteve-se a equação que descreve o comportamento do sensor em relação as variáveis de entrada. Escolheu-se analisar na frequência de 100 kHz, sendo a frequência que melhor apresenta estabilidade nos dados para a condição do estudo. O modelo obteve um R^2 de 0,932, mostrando uma alta conformidade nos dados do sensor com os dados do modelo.

$$E'_{100\text{ kHz}} = -0,00038451.T^2 - 0,99095.U.T + 0,00092155.T.D_a + 0,29728.D_a.U - 0,49845.T - 156,68.U - 0,049546.D_a + 31,341 \quad (R^2 = 0,932)$$

(Equação 5)

Como o modelo utilizado para a resposta do sensor é multivariável (quatro variáveis), não foi possível demonstrar graficamente. Para tal demonstração, determinou-se uma temperatura estabelecida em 24°C para que fosse possível, pelo modelo, obter uma superfície de resposta que relacionasse a massa específica (ρ) e o teor de água (U) com a permissividade dielétrica real (ϵ').

Na Figura 7, demonstra-se que como a massa específica apresentou menor influência na permissividade dielétrica real (ϵ') quando comparado com o teor de água (U) das sementes, pois, a inclinação da superfície de resposta no eixo da massa específica (ρ) é visivelmente menor que a inclinação do teor de água das sementes (U).

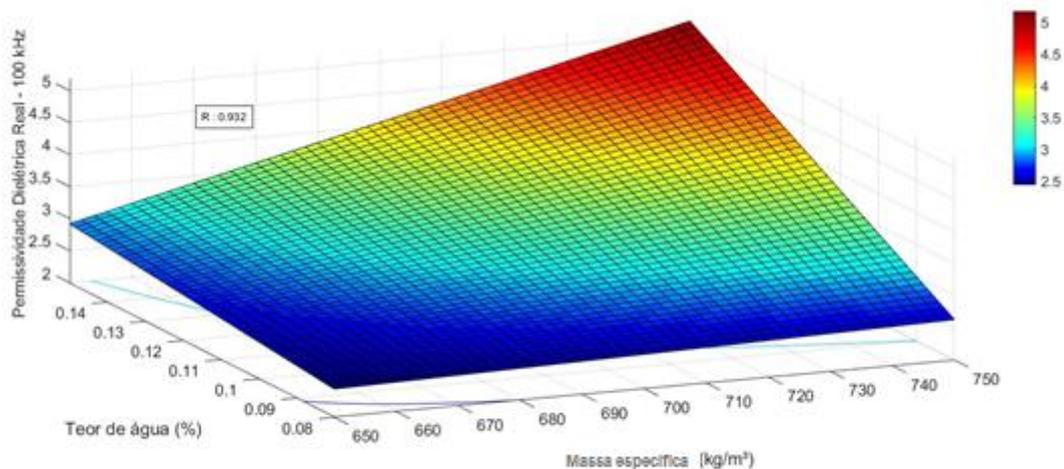


Figura 7: Superfície de resposta do modelo linear que relaciona a massa específica (ρ) e teor de água (U) de sementes de soja com a permissividade dielétrica real (ϵ') na frequência de 100 kHz e a temperatura (T) estabelecida a 24°C.

O sensor desenvolvido é eficiente para determinar a massa específica (ρ) de sementes, porém, é necessário que haja conhecimento prévio do teor de água (U) das sementes a serem medidas e, realizar a correção da temperatura (T), que pode ser facilmente medida com um sensor de temperatura dentro do sensor de capacitivo.

CONCLUSÕES

O sensor capacitivo desenvolvido, associado ao sensor de temperatura é eficiente para determinar a massa específica (ρ) de sementes de soja.

O aumento da frequência de medição do sensor constitui-se em um fator que melhora a estabilidade dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERBERT, P. A. Avaliação de três modelos dielétricos derivados da função $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ na estimativa do teor de água de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 8, n. 1, p.92-101, 14 fev. 2004.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de grãos**. v.2, n.10 (2015) - Brasília: Conab, 2015, 82p.

JONES, C. L. et al. Plant biomass estimation using dielectric properties. American Society Of Agricultural Engineers, Portland, v. 1, n. 063092, p.1-15, ago. 2006.

KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. **Electromagnetics**. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha Ltd, 1973. 828p.

KIM, K. B. et al. On-Line Measurement of Grain Moisture Content Using RF Impedance. American Society Of Agricultural Engineers, [s. L.], v. 46, n. 3, p.861-867, jan. 2003.

KUMHÁLA, František; PROLEK, Václav; BLAHOVEC, Jiří. Capacitive throughput sensor for sugar beets and potatoes. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v. 102, n. 1, p.36-43, jan. 2009. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.10.002>. Acessado em 12 dezembro de 2016

LAWRENCE, K. C; FUNK, D. B; WINDHAM, W. R. Dielectric moisture sensor for cereal grains and soybeans. **Transaction of ASAE**, v. 44; n. 6, p.1691–1696. 2001.

NELSON, S. O. Dielectric properties of agricultural products. IEEE Transactions On Electrical Insulation, Athens, v. 26, n. 5, p.845-869, 5 out. 1991.

NELSON, S. O. Agricultural applications of dielectric measurements. *IEEE Transactions On Electrical Insulation*, Athens, v. 13, n. 4, p.688-702, 21 ago. 2006.

NELSON, S. O. **Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications**. Athens: Academic Press, 2015. 292 p.

PESKE, S.; BAUDET, L. Beneficiamento de Sementes – Cap. 6. In: **SEMENTES: FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS**. 3. ed. Pelotas, RS. Editora e Gráfica Universitária, 2012. 442p.

RAMASAMY, S.; MOGHTADERI, B.. Dielectric Properties of Typical Australian Wood: Based Biomass Materials at Microwave Frequency. **Energy & Fuels**, Callaghan, v. 24, n. 8, p.4534-4548, 2010.

SACILIK, KI; COLAK, A. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. **Powder Technology**. Ankara, p. 365-370. 17 abr. 2010.

SINGH, H. et al. Calibration of capacitive cell for measuring moisture content in grains. **International Journal Of Pure And Applied Physics**, India, v. 13, n. 1, p.146-149, 2017.

TAN, Yuesheng et al. Electrical capacitance as a proxy measurement of miscanthus bulk density, and the influence of moisture content and particle size. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s. L.], p.102-108, jan. 2017.

TRABELSI, S.; KRASZEWSKI, A. W.; NELSON, S. O. Determining physical properties of grain by microwave permittivity measurements. **1999 American Society Of Agricultural Engineers: Transactions of the ASAE**, Beltsville, v. 2, n. 42, p.531-536, 1999.

WOODBURY, G. W.; WEINHEIMER, W, H. Specific gravity – solids correlations in Russet Burbank with respect to point of origin and store history. **American Potato Journal**, Orono, v.42, p. 98-104,1965.

WILD, K., HAEDICKE, S. **Improving the accuracy of moisture sensors for forage crops**. Suécia, p.326–328. 2005.

Artigo 2

Permissividade dielétrica e qualidade fisiológica de sementes de coentro beneficiadas em mesa de gravidade

RESUMO:

A separação de sementes por diferença de massa específica é possível mediante a utilização da mesa de gravidade, equipamento base na unidade de beneficiamento de sementes (UBS). A regulagem do equipamento não pode ser realizada sem as devidas aferições sob pena de obter diferenças mínimas entre as partes separadas, mesmo acreditando-se que teria havido separação por massa específica. A determinação da massa específica das frações de sementes a serem separadas permite obter com veracidade uma separação eficiente, o que atualmente pode ser pelo “teste da canequinha”, útil, porém com baixa precisão e falta de sincronia com o funcionamento da máquina. O presente trabalho teve como objetivo a analisar os valores de permissividade dielétrica com os atributos da qualidade fisiológica de sementes de coentro, para o desenvolvimento de um sensor de medição da massa específica de sementes beneficiadas em mesa de gravidade. As sementes de coentro foram avaliadas quanto a qualidade pelos testes: germinação, primeira contagem da germinação, teste de frio, emergência em campo aos 14 e aos 21 dias e peso hectolitro com as variáveis de permissividade dielétrica (ϵ) nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz. Os dados foram submetidos a análise de correlação de Pearson e a variância e se significativos as variáveis foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As variáveis quantitativas submetidas à análise de regressão linear polinomial do primeiro grau. Houve correlação positiva entre as variáveis com as permissividades analisadas em todas as frequências com os atributos fisiológicos e físicos, exceto a emergência em campo nos dois períodos. Houve ranqueamento entre as frações descarregadas nas bicas de saída da máquina semelhante aos atributos fisiológicos e físicos, exceto para avaliação da emergência, que não foi significativo. A regressão linear indicou que o aumento da frequência melhora na conformidade de valores de permissividade. O sensor mostrou-se eficiente para a determinação da massa específica.

Palavras-chaves: Massa específica, qualidade de sementes, propriedades dielétricas, sensor capacitivo.

Artigo 2

Dielectric permissiveness and physiological quality of coriander seeds benefited from a gravity table

ABSTRACT:

The separation of seeds by specific gravity difference is possible through the use of the gravity table, base equipment in the seed processing unit (UBS). The adjustment of the equipment can not be performed without the correct measurements, otherwise minimum differences will be obtained between the separated parts, even if it were believed that there would have been separation by specific gravity. The determination of the specific gravity of the seed fractions to be separated allows a reliable separation to be obtained effectively, which can currently be useful, but with low precision and lack of synchrony with the machine operation. The present work had the objective of analyzing the dielectric permittivity values with the attributes of the physiological quality of coriander seeds, for the development of a sensor for measuring the specific gravity of seeds benefited in a gravity table. The coriander seeds were evaluated for quality by the tests: germination, first germination count, cold test, field emergence at 14 and 21 days and hectoliter weight with the variables of dielectric permittivity (ϵ) at frequencies of 1 kHz, 10 kHz and 100 kHz. The data were submitted to Pearson correlation analysis and the variance and if significant the variables were compared by the Tukey test at 5% probability. The quantitative variables submitted to polynomial linear regression analysis of the first degree. There was a positive correlation between the variables with the permittivities analyzed in all frequencies with the physiological and physical attributes, except the field emergence in the two periods. There were rankings among the fractions discharged at the machine outlet spouts similar to the physiological and physical attributes, except for emergency evaluation, which was not significant. Linear regression indicated that the increase in frequency improves the compliance of permittivity values. The sensor was efficient for determining the specific gravity.

Key-words: Physical property, seed conditioning, capacitance, quality.

INTRODUÇÃO

O coentro (*Coriandrum sativum*) é uma hortaliça e uma planta condimentar largamente utilizada no Brasil. O coentro é uma espécie olerícola da família Apiaceae e apresentam problemas de germinação, dormência e vigor (MORAES; LOPES, 1998). O coentro é cultivado por agricultores familiares, em hortas domésticas, escolares e comunitárias, e não objetiva apenas a produção da massa verde, comercializada em feiras livres e supermercados, mas também a produção de sementes de alta qualidade é um pré-requisito para a obtenção de mudas vigorosas, uniformes, estandes com produtividade e qualidade (COSTA et al; 2008). Deste modo, práticas relacionadas à melhoria da qualidade dos lotes de sementes apresenta elevada importância em todas as culturas.

O aprimoramento da qualidade das sementes, utilizando a separação por massa específica por meio do emprego da mesa de gravidade, ocorre pela remoção de sementes mais leves, imaturas, danificadas, deterioradas ou contendo materiais não desejáveis, que em sua maioria possuem peso específico menor do que as sementes não deterioradas e bem formadas (PESKE; BAUDET, 2012). Neste sentido, o desempenho na germinação e no vigor podem ser relacionados à massa volumétrica da semente (MERTZ et al., 2009). Portanto, máquinas que realizem a separação por massa específica de sementes apresentam importante papel na linha de beneficiamento. Reconhecidamente, sementes de baixa massa específica frequentemente apresentam baixo vigor ou até mesmo podem não ser viáveis (PESKE; BAUDET, 2012).

A massa específica (peso por unidade de volume ocupado por um sólido granulométrico) tem relação positiva com a concentração energética em grãos e sementes (WOODBURY; WEINHEIMER, 1965). A massa específica de um lote de sementes pode variar segundo fatores como incidência de pragas, doenças, estádios de maturação e ocorrência de chuvas próximas a colheita.

Os sensores capacitivos podem ser utilizados para a determinação de diferentes propriedades de materiais vegetais. O sinal obtido nos sensores capacitivos depende da constante dielétrica, apresentada pela mistura de ar e material. Esse dielétrico fica entre duas placas paralelas, e com o aumento da concentração de massa entre as placas há um aumento do sinal. Esses sensores têm sido amplamente

utilizados para a determinação do teor de água de materiais vegetais (LAWRENCE et al., 2001).

As propriedades físicas dos grãos, tais como massa específica, teor de água, temperatura e composição química são parâmetros importantes, e muitas vezes utilizados para determinar a qualidade e as condições ótimas para o beneficiamento e armazenamento seguro. Estas propriedades podem ser determinadas de forma indireta, rápida e não destrutiva por meio de medições da permissividade complexa. Com a crescente demanda por monitoramento e controle *on-line* em indústrias altamente automatizadas, a aplicação deste conceito seria fornecer uma solução adequada para a medição dessas propriedades (TRABELSI; KRASZEWSKI; NELSON, 1999).

As propriedades dielétricas ou a permissividade dielétrica de materiais agrícolas e produtos alimentares são bons parâmetros para determinar a forma como eles interagem com um campo elétrico. As frequências de microondas, assim como as propriedades dielétricas determinam a taxa de aquecimento que os materiais sofrem ao serem submetidos a intensos campos elétricos em frequências de microondas (SACILIK; COLAK, 2010).

Empregando um dispositivo de aplicação de radiofrequência para detectar o teor de matéria seca de vários produtos agrícolas, Snell et al. (2002) descobriram que a massa específica do material teve uma influência significativa sobre a precisão da estimativa. As propriedades dielétricas de muitos materiais dependem da frequência aplicada, do teor de água, da massa específica, da temperatura e da composição química desses materiais.

Segundo Kumhála, Prošek e Blahovec (2009), as vantagens de um sensor capacitivo são sua relativa simplicidade, sua possível adequação às condições de operação, muitas vezes difíceis de encontrar em máquinas agrícolas, e seu baixo custo. Pode-se constatar a partir de pesquisas que, para usar um sensor capacitivo, o teor de água do material e a massa específica, bem como a frequência do dispositivo de medição, a temperatura circundante e a distribuição do material medido entre as placas de capacitor, todos devem ser levados em conta.

A permissividade dielétrica complexa, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, representa a interação matéria onda considerada como a assinatura elétrica de um dado material. A parte real (ϵ') é a constante dielétrica, indicada como a capacidade de um material armazenar energia

do campo elétrico da onda eletromagnética e a parte imaginária (ϵ'') é o fator de perda dielétrica, que representa a capacidade de dissipação de energia de um material. Ambas as partes são dependentes de frequência de medição, massa específica, teor de umidade, temperatura e composição química do material (NELSON, 2015).

O presente trabalho teve como objetivo a analisar os valores de permissividade dielétrica com os atributos da qualidade fisiológica de sementes de coentro, para o desenvolvimento de um sensor de medição da massa específica de sementes beneficiadas em mesa de gravidade.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório Didático de Beneficiamento de Sementes da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel – Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

Foram utilizadas sementes de coentro, cultivar Akatu, produzidas na safra 2015, com massa específica de 704kg m^{-3} e teor de água médio de 11% (b.u.).

As sementes de coentro utilizadas já haviam sido limpas previamente, mas não haviam tido passado na mesa de gravidade. Elas foram colocadas em uma tulha localizada acima do sistema de alimentação da mesa de gravidade. A mesa utilizada foi da marca *Seed Processing Holland*, Modelo STS-MC3, que tem um eixo terminal de 1,0m de largura, sendo dividido em quatro frações: baixa com 10cm, intermediária baixa com 40cm, intermediária alta com 40cm e alta com 10cm

. Os tratamentos foram constituídos das frações obtidas no depósito da alimentação e nas partes: alta, intermediária alta, intermediária baixa e baixa. A amostragem foi procedida retirando-se cinco amostras de cada tratamento, com peso médio de 300g, em intervalos regulares de tempo de 5 minutos. As amostras coletadas foram acondicionadas em sacos de papel e mantidas em câmara fria e seca (temperatura média de 15°C e UR de 35%) até a realização das avaliações.

As regulagens da mesa de gravidade foram determinadas em testes preliminares, sendo utilizadas para o estudo a inclinação longitudinal 1,0 cm, inclinação lateral 3,0 cm e oscilação de 400 Hz. Na alimentação foi ajustada a 60% do máximo com abertura do alimentador em 2,0 cm, sendo o fluxo de ar está com abertura de 60% da entrada do ar e ajuste do fluxo de ar em 50%.

Para realizar as medições de permissividade dielétrica utilizou-se um sensor capacitivo cilíndrico (Figuras 8), constituído de dois cilindros concêntricos de alumínio de 1,5mm com diâmetro externo de 50,8mm e interno de 19,0mm. Os cilindros possuem 225mm de comprimento, sendo que 55mm ficam dentro da base com o PVC expandido funcionando como dielétrico e outros 170mm ficam disponíveis para as sementes (Figura 8).

Entre os cilindros foram acomodadas as sementes de coentro, que serviram de material dielétrico para este capacitor. Para garantir a manutenção do volume calculado do cilindro, após o sensor ser abastecido foi utilizada uma régua para passar rente à parte superior do sensor, na tentativa de retirar o excesso de sementes. Dois condutores são ligados ao cilindro para que se possa fazer a leitura dessa capacitância.

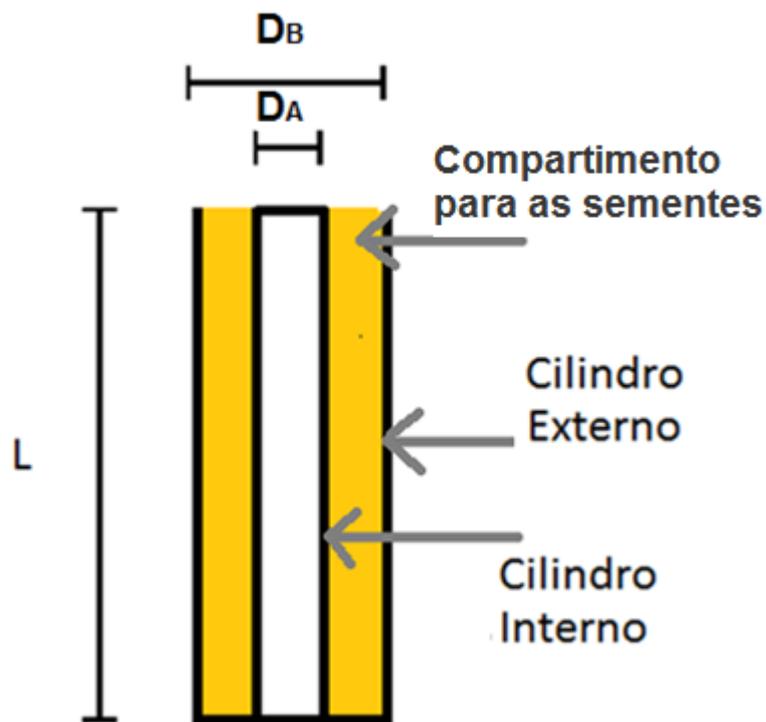


Figura 8: Esquema do sensor capacitivo cilíndrico.

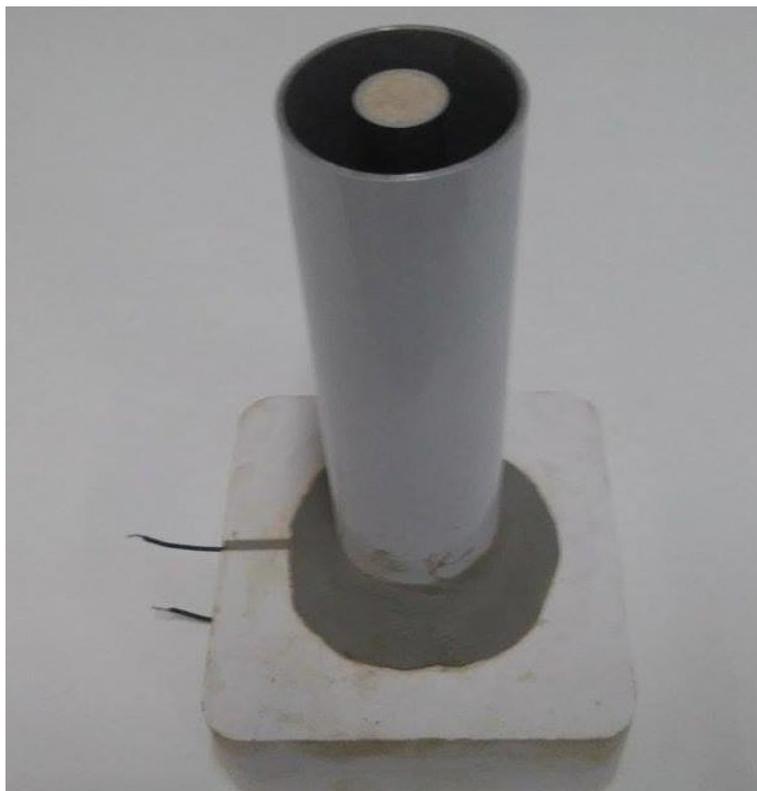


Figura 9: Sensor de cilindros concêntricos desenvolvido com tubos de alumínio e base de PVC expandido

Na medição do sensor foi utilizado um medidor LCR, que analisa a impedância elétrica, sendo essa a alteração no fluxo magnético, com leitura de grande número de parâmetros de resistores, indutores e capacitores em diversas frequências. O LCR utilizado foi U1731C da *Keysigth Technologies®* que é capaz de realizar medições em 5 frequências diferentes 100 Hz, 120 Hz, 1kHz, 10kHz e 100kHz. Nesse trabalho foram utilizadas apenas as três últimas frequências, porque nas frequências mais baixas há uma grande instabilidade pelos baixos valores de capacitância gerados pelo sensor.

As amostras coletadas nas quatro frações da descarga da mesa de gravidade foram analisadas pelo sensor capacitivo, com a leitura da capacitância nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz. Para cada leitura do sensor abastecido foi realizada uma leitura do sensor vazio. Essa leitura foi realizada para cálculo da razão entre a capacitância da amostra e pela capacitância do sensor a vazio que é correspondente a permissividade dielétrica do material.

A qualidade das sementes foi avaliada pelos seguintes testes:

O peso hectolitro (*PH*) foi determinado a partir do uso da balança marca Dalle Molle, sendo determinado de acordo com Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 1992), os resultados foram expressos em $kg. hL^{-1}$.

Teste de germinação (*G*), realizado com quatro amostras de 50 sementes, colocadas em substrato de papel mata-borrão, previamente umedecido em água destilada na proporção de 2,5 vezes a massa do papel seco e mantidas em germinador à temperatura de 20 °C. As avaliações foram efetuadas aos oito dias após a semeadura, conforme as Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009) e os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais. A primeira contagem da germinação (*PCG*) foi avaliada aos quatro dias após a semeadura, por ocasião da realização do teste de germinação.

Teste de frio (*TF*) - foram utilizadas quatro repetições de 50 sementes, distribuídas em substrato de papel mata-borrão, previamente umedecido com água destilada utilizando-se 2,5 vezes a massa do papel seco. Os substratos com as sementes colocados Gerbox no interior de sacos plásticos e mantidos em refrigerador a 10°C, durante sete dias. Após este período, procedeu-se o teste de germinação conforme descrito anteriormente. A avaliação ocorreu após quatro dias, sendo os resultados expressos em porcentagem de plântulas normais (CÍCERO; VIEIRA 1994).

Emergência em campo (*EC*), realizada com quatro repetições de 100 sementes em canteiros de cultivo medindo 5,0 x 1,2 x 1,0m, preenchidos com solo peneirado, coletado de um horizonte A1 de um Planossolo Háplico Eutrófico Solódico (EMBRAPA, 2013), pertencente à unidade de mapeamento. Após a semeadura, os canteiros foram irrigados diariamente, mantendo-se o solo próximo à capacidade de campo. As avaliações foram realizadas aos 14 e aos 21 dias após a semeadura, determinando-se a porcentagem de emergência de plântulas (NAKAGAWA, 1999).

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F na ANOVA a 5% de probabilidade. As variáveis respostas foram submetidas à análise de Correlação de Pearson análise de regressão linear, entre o peso hectolitro e a permissividade. Para comparação de médias entre as frações de sementes obtidas no eixo terminal de descarga nas saídas da mesa de gravidade, empregou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para o procedimento estatístico, utilizou-se o programa R, versão 3.1.1. e o pacote de dados “agricolae”.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve uma alta correlação positiva (superior a 89%) entre as variáveis de permissividade dielétrica (ϵ) e o peso hectolitro (PH), indicando que o sensor capacitivo tem uma alta resposta à variação da massa específica e em todas as frequências analisadas (Tabela 4). Também houve uma correlação positiva entre permissividade dielétrica (ϵ) com os testes de germinação (64%), primeira contagem da germinação (60%) e teste de frio (52%) em todas as frequências analisadas. Não se observou correlação entre as variáveis de permissividade dielétrica (ϵ) com a emergência a campo aos 14 dias ($E14$) e aos 21 dias ($E21$) em todas as frequências. Contudo, uma alta correlação significa apenas uma tendência de variação semelhante entre duas características, não devendo ser interpretada isoladamente (LEAL et al., 2012).

Tabela 4: Correlação de Pearson entre as variáveis germinação (G), primeira contagem da germinação (PCG), teste de frio (TF), emergência a campo aos 14 ($E14$) e aos 21 dias ($E21$), peso hectolitro (PH) e as variáveis de permissividade dielétrica (ϵ) nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz.

Correlação de Pearson	G	PCG	TF	E14	E21	PH	ϵ 1kHz	ϵ 10kHz	ϵ 100kHz
G	-	0,79***	0,59**	0,30	0,31	0,61**	0,62**	0,64**	0,65*
PCG		-	0,53*	0,22	0,22	0,62*	0,58*	0,60*	0,61*
TF			-	0,56*	0,55*	0,55*	0,51*	0,52*	0,53*
E14				-	0,79***	0,22	0,18	0,18	0,20
E21					-	-0,07	-0,09	-0,10	-0,08
PH						-	0,89***	0,91***	0,92***
ϵ 1kHz							-	0,99***	0,99***
ϵ 10kHz								-	0,99***
									-

^{ns} - Não significativo; * Significativo a 0,05%; ** Significativo a 0,01%; *** Significativo a 0,001%;

Os pontos de coleta da porção terminal da descarga da mesa de gravidade diferiam quanto a germinação (G), a primeira contagem de germinação (PCG) e o teste frio (TF) das frações alta com a baixa. Já as frações intermediárias não diferiam entre a alta nem a baixa. Isso se deve a separação de sementes com massa específica na fração alta. A separação das frações descarregadas na mesa de

gravidade em níveis de vigor concordam com Buitrago et al. (1991) e Fantinatti et al. (2002), em sementes de feijão, Baudet e Misra (1991) em sementes de milho, Gadotti et al. (2006) em sementes de brócolis e Gadotti et al. (2012) em sementes de tabaco. Nos testes de emergência em campo aos 14 (E14) e os 21 dias (E21) não ocorreram diferença entre as frações. Houve diferença quanto ao peso hectolitro (PH), onde as frações diferenciaram entre si em quatro níveis, evidenciando a eficiência da mesa de gravidade na separação quanto a diferenças de massa específica (Tabela 5).

Tabela 5: Germinação (G), primeira contagem da germinação (PCG), teste de frio (TF), emergências a campo ao 14 (E14) e aos 21 dias (E21) e o peso hectolitro (PH) das sementes de coentro das diferentes frações da mesa de gravidade.

Fração	G (%)	PCG (%)	TF (%)	E 14 (%)	E21 (%)	PH (kg hL ⁻¹)
Controle	73 ab*	63 ab	72 ab	35 ^{ns}	67 ^{ns}	70,4 b
Alta	77 a	69 a	73 a	39	72	76,4 a
Intermediária alta	70 ab	63 ab	69 ab	34	71	71,5 b
Intermediária baixa	70 ab	63 ab	70 ab	33	71	68,1 c
Baixa	65 b	56 b	65 b	34	72	61,8 d
C.V.(%)	6,48	8,41	5,10	20,07	14,03	1,09

*Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p≤0,05).

ns = Não significativo

Na permissividade dielétrica (ϵ) na frequência de 1 kHz diferenciaram as frações alta, intermediária alta e baixa. A fração intermediária baixa foi semelhante a intermediária alta e não diferiu da baixa. Já a permissividade dielétrica (ϵ) nas frequências de 10 kHz e 100 kHz, diferenciaram-se entre as frações alta, intermediárias e baixa. As intermediárias alta e baixa apresentaram similaridade, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 6: Permissividade dielétrica (ϵ) nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz da cultivar de coentro.

Fração	ϵ 1kHz	ϵ 10kHz	ϵ 100kHz
Alta	4,46 a*	2,71 a	1,99 a
Intermediária alta	4,17 b	2,54 b	1,89 b
Intermediária baixa	4,10 cb	2,49 b	1,86 b
Baixa	4,00 c	2,42 c	1,82 c
C.V.(%)	1,37	1,34	0,96

*Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$

Analisando as separações de médias pode-se inferir que as variáveis germinação, primeira contagem de germinação, teste frio e peso hectolitro, apresentaram resultado de diferenciação similares aos encontrados nas permissividades dielétricas (ϵ) especialmente nas frequências de 10 kHz e 100 kHz, indicando que as variáveis de permissividades dielétricas podem ser utilizadas como uma variável auxiliar para identificar a separação de para sementes de coentro na mesa de gravidade.

Para análise de regressão linear utilizaram-se as variáveis de peso hectolitro (PH) e permissividade dielétrica (ϵ), através de um modelo linear polinomial de grau 1 (Equação 6).

$$\epsilon \sim 1 + PH \quad \text{Equação 6}$$

A análise de regressão linear indica que, pelos valores de R^2 , há um aumento da precisão associada com aumento da frequência (Figura 5). Há uma redução da inclinação nas retas com aumento da frequência, indicando que a variação da permissividade dielétrica é menor em relação à variação do peso hectolitro. Além disso, pelo valor de R^2 pode-se constatar que esses dados são mais representativos. Na frequência de 100 kHz obteve-se o melhor resultado, indicando que o aumento das frequências possibilita precisões mais elevadas como encontrado por Singh et al. (2017). Os resultados alcançados evidenciam que a permissividade dielétrica dependem da frequência de medição e da massa específica do material, entre outros por Snell et al. (2002) e por Kumhála, Prošek e Blahovec (2009).

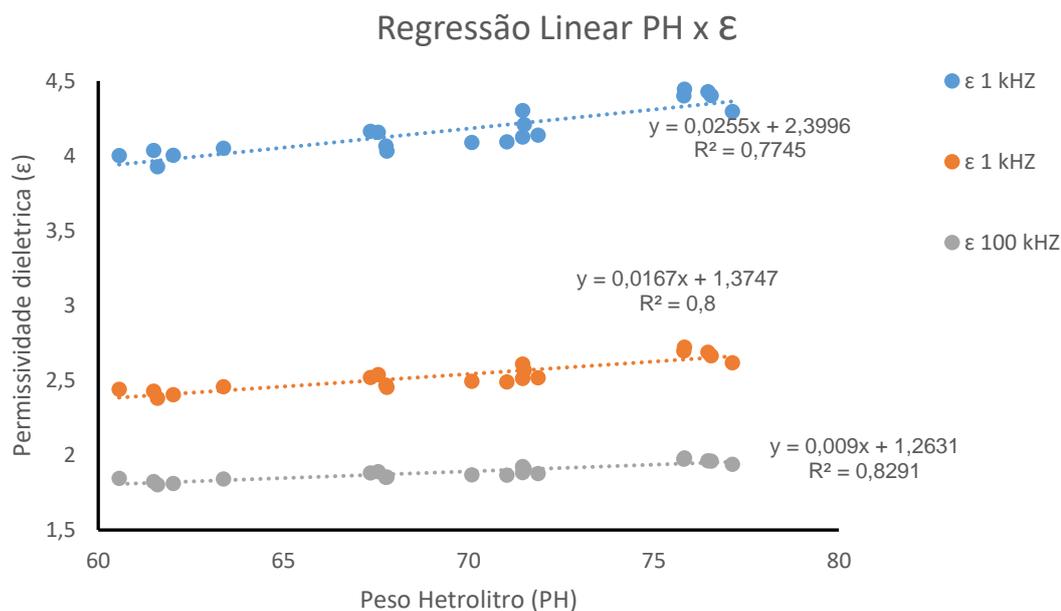


Figura 10: Análise de regressão linear entre peso hectolitro (PH) e permissividade dielétrica (E) nas frequências de 1 kHz, 10 kHz e 100 kHz.

O sensor de medição de massa específica que foi construído e analisado, é um elemento que pode ser aperfeiçoado e adaptado para ser utilizado na automação de outras máquinas de beneficiamento que utilizam o mesmo princípio físico da mesa de gravidade, tais como ventilões, separador pneumático, etc.

CONCLUSÃO

A utilização do sensor capacitivo é eficiente para mensuração da massa específica das sementes de coentro, beneficiadas em mesa de gravidade.

A frequência de 100 kHz é adequada para medição da permissividade dielétrica de sementes de coentro.

Há forte associação entre a permissividade dielétrica e os atributos da qualidade de sementes de coentro, beneficiadas em mesa de gravidade.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2009. 395p.
- BAUDET, L.; MISRA, M. Atributos de qualidade de sementes de milho beneficiadas em mesa de gravidade. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v.13, n.2, p.91-97, 1991.
- BAUDET, M. L.; T., Peske S. T. Beneficiamento de Sementes. In: T., Peske S.; VILLELA, Francisco Amaral; MENEGHELLO, G. E. Fundamentos Científicos e Tecnológicos. 3. ed. Pelotas: Universitária/ufpel, 2012. Cap. 6, p. 573.
- BUITRAGO, I.C.; VILLELA, F.A.; TILLMANN, M.A.A.; SILVA, J.B. Perdas e qualidade de sementes de feijão beneficiadas em máquina de ventiladores e peneira e mesa de gravidade. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v.13, n.2, 1991.
- CICERO, S.M.; VIEIRA, R.D. Teste de frio. In: VIEIRA, R.D.; CARVALHO, N.M. (Ed.) **Testes de vigor em sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994. p.151-164.
- COSTA, C.J.; TRZECIAK, M.B.; VILLELA, F.A. Potencial fisiológico de sementes de brássicas com ênfase no teste de envelhecimento acelerado. **Revista Horticultura Brasileira**, Brasília, v.26, n. 2, p.144-148, 2008.
- FANTINATTI, J.B.; HONÓRIO, S.L.; RAZERA, L.F. Qualidade de sementes de feijão de diversas densidades obtidas na mesa gravitacional. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v.24, n.1, p.24-32, 2002.
- GADOTTI, G. I. et al. Qualidade de sementes de couve brócolis beneficiadas em mesa densimétrica. **Revista Brasileira de Sementes**, Pelotas, v. 28, n. 2, p.123-127, ago. 2006.

GADOTTI, G.I.; VILLELA, F.A.; BAUDET, L. Influência da mesa densimétrica na qualidade de sementes de cultivares de tabaco. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília vol. 33, nº 2 p. 372 - 378, 2012.

LAWRENCE, K. C; FUNK, D. B; WINDHAM, W. R. Dielectric moisture sensor for cereal grains and soybeans. **Transaction of ASAE**, v. 44, n. 6, p.1691–1696. (2001).

LEAL, C.C.P.; TORRES, S.B.; NOGUEIRA, N.W.; TOMCZAK, V.E.; BENEDITO, C.P. Validação de testes de vigor para sementes de rúcula (*Eruca sativa* L.). **Brazilian Journal of Biosciences**. [S.l.] v. 10, p. 421-424, 2012.

LOLLATO, M.A.; SILVA, W.R. Efeitos da utilização da mesa gravitacional na qualidade de sementes de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19, n.2. p.1483-1496. 1984.

KUMHÁLA, F; PROŁEK, V; BLAHOVEC, J. Capacitive throughput sensor for sugar beets and potatoes. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v. 102, n. 1, p.36-43,2009. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.10.002>. Acessado em 12 dezembro de 2016

MERTZ, L.M.; HENNING, F.A.; MAIA, M.S.; MENEGHELLO, G.E.; HENRIQUES. A.; MADAIL, R. Qualidade fisiológica e sanitária de sementes de feijão-miúdo beneficiadas em mesa gravitacional. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v.29, n.3, p.1-7, 2009. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010131222007000300001&script=sci_abstract&tlng=pt Acessado em: 13 de dezembro de 2016.

MORAES, D.M.; LOPES, N.F. Germinação e vigor de sementes de coentro (*Coriandrum sativum* L.) submetidas a reguladores de crescimento vegetal. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 20, n 1, p.93-99 – 1998.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA-NETO, J.B. **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, Cap.2, p.9-13. , 1999.

OLIVEIRA, E.Q.; BEZERRA NETO, F.; NEGREIOS, M.Z.; BARROS JUNIOR, A.P.; FREITAS, K.K.C.; SILVEIRA, L.M.; LIMA, J.S.S. Produção e valor agroeconômico no consórcio entre cultivares de coentro e de alface. **Horticultura Brasileira**, v.23, n.2, p.285-289, 2005.

SACILIK, Kamil; COLAK, Ahmet. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. **Powder Technology**. Ankara, p. 365-370, 2010.

SNELL, H. G. J.; OBERNDORFER, C.; LUCKE W; VAN DEN WEGHE, H. F. A.. Use of electromagnetic fields for the determination of the dry matter content of chopped maize. **Biosystems Engineering**, v.82, n.3, p269–277, 2002.

SINGH, Harinder et al. Calibration of Capacitive Cell for Measuring Moisture Content in Grains. **International Journal Of Pure And Applied Physics**, India, v. 13, n. 1, p.146-149, jan. 2017.

TRABELSI, S.; KRASZEWSKI, A.W.; NELSON, S. O. New density-independent calibration function for microwave sensing of moisture content in particulate materials. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v.47, n.3, p.613-622, 1998.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sensor capacitivo se mostrou eficaz na determinação da massa específica, se há o conhecimento prévio do teor de água e temperatura das sementes. Para que a temperatura possa ser determinada, a instalação de um sensor de temperatura associado ao sensor desenvolvido é uma alternativa possível. Sendo que, o teor de água teria que ser determinado para aumentar a precisão.

O sensor capacitivo pode ser utilizado em mesas de gravidade, pois é necessário mensurar a diferença percentual entre a massa específica das sementes que se distribuem ao longo da porção terminal da descarga da máquina. Assim, a temperatura e o teor de água seriam praticamente constantes em todas as frações de sementes na saída da mesa, podendo ser medido em tempo real e servir como parâmetro para automação da mesa de gravidade.

Pode-se constatar que o aumento da frequência determinou incremento real na precisão, porém cabe destacar a real necessidade de novas pesquisas com frequências mais elevadas para obter resultados mais precisos e sua viabilidade econômica de construção do sensor.

A utilização da permissividade dielétrica das sementes de coentro mostrou-se um parâmetro eficiente para a estratificação de lotes de sementes quanto a qualidade com resultados semelhantes aos dos testes de viabilidade e vigor.

O sensor capacitivo construído (sensor de massa específica), constitui-se em um elemento com utilização potencial para outros maquinários de beneficiamento de sementes que utilizam o mesmo princípio físico da mesa de gravidade, tais como ventilões, separador pneumático, etc. Também para o desenvolvimento de novos equipamentos, fornecendo dados de massa específica de forma automática para o controle de cada saída de descarga das máquinas. A partir dessa medida, pode-se ajustar a saída para uma melhor separação e assim obter lotes de sementes de melhor qualidade fisiológica na UBS.

REFERENCIAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. ; ANDRADE, E. T. Análise da variação das propriedades físicas e contração volumétrica dos grãos de milho durante a dessecção. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.25, n.1, p. 15-21. 2000

ARAÚJO, A. S.; OLIVEIRA, A. L.; BAUDET, L. M. A UBS em tempos de automação. **Seednews**, Pelotas, v. XVIII , n. 5, p.12-15, set. 2014.

BARTTLEY Jr., R.W NELSON, S.O.; McClendon, Dimensional analysis of a permittivity measurement probe, **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement** V. 51 n.6, p. 1312–1315p, 2002.

BARROS JÚNIOR, A. P.; BEZERRA NETO, F.; NEGREIROS, M. Z.; OLIVEIRA, E. Q.; SILVEIRA, L. M.; CÂMARA, M. J. T. Desempenho agrônomo de cultivares comerciais de coentro em cultivo solteiro sob condições de temperatura elevada e ampla luminosidade. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 17, n. 2, p. 82-86, 2004.

BERBERT, P.A. et al. Avaliação de três modelos dielétricos derivados da função $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ na estimativa do teor de água de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 8, n. 1, p.92-101, 14 fev. 2004.

BERTINI, C. H. M.; PINHEIRO, E. A. R.; NÓBREGA, G. N.; DUARTE, J. M. L. Desempenho agrônomo e divergência genética de genótipos de coentro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 3, p. 409-416, 2010.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos - Safra 2014/15**, n. 10 - Décimo levantamento, Brasília, p.109, 2015.

EMBRAPA - CNPSo. Tecnologias de Produção de Soja da Região Central do Brasil 2007. Londrina-PR, 2006. 225p. 2007.

BRASIL, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento - MAPA. Disponível em: <agricultura.gov.br>. Acessado em: 04 dez. 2015.

MOHSEIN, N.N. Physical properties of plant and animal material. **Gorson and Breach Science Publishess**. Nova Iorque. 2 ed, p.742, 1978.

NASCIMENTO, W. M.; PEREIRA, R. S.; FREITAS, R. A.; BLIMER, L. MUNIZ, M. F. B. Colheita e armazenamento de sementes de coentro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.12, p.1793-1801, 2006.

NELSON, R.W; TRABELSI, S. Principle for microwave moisture and density measurement in grain and seed. **International Microwave Power Institute**, n. 39, v.2, p.107- 117, 2004.

NELSON, R.W; BARTTLEY Jr., S.O. Measuring frequency-and temperature-dependent dielectric properties of food materials. **Transactions of the ASAE**, n. 43, v.6, p.1733–1736 , 2000.

NELSON, S. O; **Dielectric properties of agricultural materials and their applications**. Athens: Academic Press, 292.p, 2015.

PELÚZIO, J.M.; FIDELIS, R.R.; JÚNIOR, D.A.; SANTOS, G.R.; DIDONET, J. Comportamento de cultivares de soja sob condições de várzea irrigada no sul do estado do Tocantins, entressafra 2005. **Bioscience Journal**, v.24, n.1, p.75-80, 2008.

PEREIRA, R. S.; MUNIZ, M. F. B.; NASCIMENTO, W. M. Aspectos relacionados à qualidade de sementes de coentro. **Horticultura Brasileira**, v.23, n.3, p.703-706, 2005.

PEREIRA, M. D.; MARTINS FILHO, S.; LAVIOLA, B. G. Envelhecimento acelerado em sementes de pinhão-manso. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 1, p. 119-123, 2012.

PEREIRA, M. F. S.; TORRES, S. B.; LINHARES, P. C. F.; PAIVA, A. C. C.; PAZ, A. E. S.; DANTAS, A. H. Qualidade fisiológica de sementes de coentro (*Coriandrum sativum* L.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 13, p. 518-522, 2011.

PESKE, S.; BAUDET, L. Beneficiamento de Sementes – Cap. 6. In: **SEMENTES: FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS**. 3. ed. Pelotas, RS. Editora e Gráfica Universitária, 2012. 442p.

RAVI, R. PRAKASH, M. BHAT, K. K. Aroma characterization of coriander (*Coriandrum sativum* L.) oil samples. **European Food Research and Technology**, v. 225, n. 3-4, p. 367-374, 2007.

SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 559 p.

SACILIK, K; COLAK, A. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. **Powder Technology**, Ankara, p. 365-370, 2010.

TRABELSI, S.; KRASZEWSKI, A.W.; NELSON, S. O. New density-independent calibration function for microwave sensing of moisture content in particulate materials. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v.47, n.3, p.613-622, 1998.