

**PROPOSTA COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO ON-LINE DO
TEOR DE ÁGUA DE GRÃOS DE SORGO**

EROS ESTEVÃO DE MOURA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
DEZEMBRO – 2012**

PROPOSTA COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO ON-LINE DO TEOR DE ÁGUA DE GRÃOS DE SORGO

EROS ESTEVÃO DE MOURA

Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Pedro Amorim Berbert

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
DEZEMBRO – 2012**

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCTA / UENF** 003/2013

Estevão de Moura, Eros

Proposta computacional para medição on-line do teor de água de grãos de sorgo / Eros Estevão de Moura. – 2013.
147 f. : il.

Orientador: Pedro Amorim Berbet

Tese (Doutorado - Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2013.

Bibliografia: f. 137 – 147.

1. Proposta computacional 2. Medição on-line 3. Teor de água 4. Grãos de Sorgo I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. II. Título.

CDD –
633.174

PROPOSTA COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO ON-LINE DO TEOR DE ÁGUA DE GRÃOS DE SORGO

EROS ESTEVÃO DE MOURA

Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

Aprovada em 04 de dezembro de 2012

Comissão Examinadora

Prof^a. Annabell Del Real Tamariz D.S., Engenharia Elétrica
(Ciência da Computação / Inteligência Computacional) – UENF

Prof. Ricardo Ferreira Garcia D.S., Engenharia Agrícola
(Desenvolvimento de Sistemas para Agricultura de Precisão) – UENF

Prof^a. Sahudy Montenegro González D.S., Engenharia Elétrica
(Ciência da Computação / Bancos de Dados) – UFSCAR

Prof. Pedro Amorim Berbert PhD, Engenharia Agrícola – UENF
Orientador

AGRADECIMENTOS

Ao professor Pedro Amorim Berbert, pela orientação, paciência, amizade, respeito e apoio durante todo o trabalho.

Ao professor Ricardo Ferreira Garcia, por ter possibilitado que este sonho se realizasse.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pela disponibilidade de utilização do espaço acadêmico e laboratórios.

Às funcionárias da Coordenação de Pós-graduação em Produção Vegetal, Maria de Fátima dos Santos Sampaio, Luciana Tavares Nogueira e Patrícia Laurindo, pela atenção e presteza.

Aos colegas do curso de Pós-graduação que, de maneira geral, sempre foram companheiros e amigos.

A minha esposa e aos meus filhos, pelo apoio quando precisei.

E a Deus, porque sem Ele nada acontece.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	9
2.1. A cultura do sorgo.....	9
2.2. Classificação dos métodos de medição do teor de água em grãos	12
2.3. O princípio capacitivo: conceitos e definições.....	15
2.3.1. Capacitor.....	15
2.3.2. Dielétrico	15
2.3.3. Dielétrico perfeito	15
2.3.4. Dielétrico imperfeito.....	16
2.3.5. Capacitância	16
2.3.6. Absorção dielétrica.....	19
2.3.7. Corrente de condução.....	20
2.3.8. Polarização	20
2.3.9. Frequência de relaxação.....	21
2.3.10. Permissividade elétrica relativa ϵ' e fator de perda dielétrica ϵ''	22

2.4. Água em sementes: formas, forças e o fenômeno da sorção	23
2.5. Natureza da variação das propriedades dielétricas de grãos e sementes	26
2.5.1. Efeito do teor de água	27
2.5.2. Efeito da frequência	33
2.5.3. Efeito da temperatura.....	39
2.5.4. Efeito da massa específica aparente	41
2.5.5. Sensor capacitivo: características construtivas	42
3. TRABALHOS	49
3.1. Trabalho 1: Programa em LabVIEW para estimar o teor de água de sementes de sorgo (<i>Sorghum Bicolor</i> (L.) Moench).....	49
3.1.1. INTRODUÇÃO	51
3.1.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	55
3.1.2.1. Sementes de sorgo	56
3.1.2.2. Capacitor de cilindros concêntricos	56
3.1.2.3. Hardware	57
3.1.2.4. Software	60
3.1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
3.1.4. CONCLUSÕES	73
3.1.5. AGRADECIMENTOS	74
3.1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
3.2. Trabalho 2: Frequency, Moisture Content, Bulk Density and Hybrid Effects on Grain Sorghum Dielectric Properties.....	78
3.2.1. INTRODUCTION.....	78
3.2.2. MATERIAL AND METHODS.....	81
3.2.2.1. Sample container and measuring principle.....	81
3.2.2.2. Equipment and procedures	81
3.2.2.3. Grain sorghum samples	82
3.2.3. RESULTS AND DISCUSSION.....	84
3.2.3.1. Bulk density	84

3.2.3.2. Dielectric parameters of four grain sorghum hybrids	86
3.2.4. CONCLUSIONS	98
3.2.5. ACKNOWLEDGEMENTS	99
3.2.6. REFERENCES.....	99
3.3. Trabalho 3: Performance Analysis of RF Dielectric Models for Density- Independent Estimation of Moisture Content in Sorghum	104
3.3.1. INTRODUCTION.....	105
3.3.2. MATERIAL AND METHODS.....	108
3.3.2.1. Sample container and measuring principle.....	108
3.3.2.2. Equipment and procedures	108
3.3.2.3. Grain sorghum samples	108
3.3.2.4. Methods for the derivation of density-independent equations for moisture content determination in sorghum.....	110
3.3.2.5. Statistical analysis	114
3.3.3. RESULTS AND DISCUSSION.....	115
3.3.3.1. Reduction of the bulk density effect by simultaneous measurement of dielectric parameters at two frequencies	115
3.3.3.2. Reduction of the bulk density effect by measuring two dielectric parameters (ϵ' and ϵ'') at a single frequency	119
3.3.3.3. Evaluation of the degree of suitability of the bulk density- independent dielectric models to estimate sorghum moisture content.....	120
3.3.4. CONCLUSIONS.....	126
3.3.5. ACKNOWLEDGMENTS.....	127
3.3.6. REFERENCES.....	127
4. RESUMO E CONCLUSÕES.....	133
4.1. TRABALHO 1.....	134
4.2. TRABALHO 2.....	135
4.3. TRABALHO 3.....	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137

RESUMO

MOURA, Eros Estevão de, D. Sc. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, dezembro de 2012. **Proposta computacional para medição on-line do teor de água de grãos de sorgo.** Orientador: Pedro Amorim Berbert.

O interesse na utilização das propriedades dielétricas de produtos agrícolas granulares tem aumentado devido ao seu potencial para aplicação em novas tecnologias, como a medição contínua do teor de água em operações que utilizam controle automático de processos, como a colheita, a secagem e a aeração. O procedimento mais eficaz para diminuir os erros que alterações no fluxo de massa ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$) provocam na estimativa do teor de água dos grãos é a utilização de modelos dielétricos que empregam a permissividade elétrica relativa (ϵ') e o fator de perda dielétrica (ϵ'') do produto. Para o desenvolvimento e calibração de um protótipo para medição on-line do teor de água que seja abrangente é preciso derivar modelos dielétricos para diversos tipos de grãos. Esse procedimento já foi realizado para a maioria dos grãos de cereais, oleaginosas e, de forma limitada, para o café. Dentre os cereais mais importantes, em termos econômicos e de produção, o sorgo é o único que ainda não teve suas propriedades dielétricas estudadas. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo investigar a variação das propriedades dielétricas dos grãos de sorgo em função da frequência de oscilação do campo eletromagnético (75 kHz a 5 MHz), do teor de água (7 a 23% b.u.) e da massa específica aparente ρ (575 a 819 kg m^{-3}), para

quatro híbridos (BRS 308, BRS 310, BRS 655 e CMSXS 769), empregando-se um medidor de parâmetros de impedância HP 4285A. Além disso, avaliou-se o grau de adequação de três modelos dielétricos para estimativa acurada do teor de água dos grãos, independentemente da massa específica aparente. Para aumentar a eficiência na coleta e análise dos dados, desenvolveu-se um programa em LabVIEW que se mostrou eficaz no controle, na configuração e na leitura dos valores medidos de capacitância e condutância de um sensor capacitivo, contendo as amostras de grãos. Além disso, o programa efetuou o cálculo imediato de ϵ' e ϵ'' , permitindo a estimativa indireta do teor de água de amostras. As medições das propriedades dielétricas revelaram que o valor de ϵ' , para qualquer valor de teor de água avaliado e para valores similares de ρ diminui regularmente em função do aumento da frequência. A variação de ϵ'' em função da frequência foi menos regular que aquela de ϵ' , sendo definida por curvas parabólicas ora com concavidade voltada para cima ora para baixo, em gráfico semi-log, dependendo do teor de água. A permissividade elétrica relativa ϵ' aumentou com o aumento do teor de água para qualquer valor de frequência. Modelos cúbicos de regressão, com coeficientes de determinação próximos à unidade, foram os que melhor descreveram a variação de ϵ' em função do teor de água. As alterações nos valores de ϵ' e ϵ'' , em função de alterações no valor do teor de água, foram mais significativas para os menores valores de frequência. Uma possível região de dispersão dielétrica ocorreu no intervalo entre 13 e 15% b.u., indicando alterações nos mecanismos de adsorção de água. A variação de ϵ' e ϵ'' em função da massa específica aparente foi representada por modelos lineares, com aumento da declividade em função do aumento do teor de água. O tipo de híbrido de sorgo e, conseqüentemente, o tamanho dos grãos, também teve efeito sobre as propriedades dielétricas. Grãos menores apresentaram menores valores de ϵ' e ϵ'' em relação aos híbridos que produzem grãos maiores. O modelo dielétrico que correlaciona o teor de água de grãos de sorgo aos valores de ϵ' e $\ln(\epsilon'')$, medidos a 5 MHz, foi o que apresentou maior grau de acurácia, com $R^2 = 0,91$ e erro padrão de calibração de 1,2 pontos percentuais de umidade.

ABSTRACT

MOURA, Eros Estevão de, D. Sc. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. December, 2012. Proposed computing for on-line measurement of the water content of grain sorghum. Adviser: Pedro Amorim Berbert.

Interest in dielectric properties of granular agricultural products has been increasing over the years due to their potential use for the development of innovative technologies such as on-line grain moisture content measurement in the following operations demanding automatic control systems: harvest, drying and aeration. The most effective procedure to reduce errors in moisture estimation introduced by variation in grain mass flow rate ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$) is the development of dielectric models based on grain relative permittivity ϵ' and loss factor ϵ'' . In order to design and calibrate a prototype moisture meter for on-line application, the dielectric properties of various types of products must be measured and the respective dielectric models derived. Models that correlate moisture content to the dielectric properties have been developed for the majority of cereal grains and oilseeds, and, to a limited extension, for parchment coffee. However, among the most important cereal crops, both in economic and production terms, only sorghum has not yet had its dielectric properties investigated. Therefore, the object of this work was to study the variation of the dielectric properties of grain sorghum as a function of frequency (75 kHz to 5 MHz), moisture content (7 to 23% b.u.) and bulk density (575 to 819 kg m^{-3}), for four sorghum hybrids

(BRS 308, BRS 310, BRS 655 e CMSXS 769), employing an HP 4285A impedance meter. Besides, this work aimed at analyzing the effectiveness of three bulk-density independent dielectric models for sorghum moisture content estimation. To increase data collection efficiency, an application was developed with the visual programming language LabVIEW, integrated to the impedance meter, which was proved effective in the control, configuration and measurement of capacitance and conductance of a capacitive sensor both empty and filled with grain sorghum. The software was also capable of calculating the values of ϵ' and ϵ'' , allowing the prompt indirect estimation of grain sorghum moisture content. Measurements of the dielectric properties of grain sorghum revealed that its permittivity was a function of grain moisture content, bulk density, hybrid, and frequency of the applied electric field. The value of relative permittivity ϵ' , at given moisture contents and for similar values of bulk density, decreased regularly with increasing frequency. The dependence of the loss factor ϵ'' upon frequency was less regular than that of permittivity, and appeared either as upward or downward facing parabolic curves (depending on moisture) on a semi log plot. Relative permittivity increased with moisture content at every frequency where measurements were taken. The regression of moisture content on ϵ' and ϵ'' yielded cubic models with coefficients of determination very close to unity. The changes in permittivity and loss factor as a result of changes in moisture content were greater at lower rather than at higher frequencies. A region of possible dielectric dispersion was noticed in the moisture content range from 13 to 15% w.b. Straight lines were the best fit regression models representing the variation of ϵ' and ϵ'' on bulk density, with increasing slopes as moisture increases. Hybrid also had an effect on the dielectric parameters, with small-grain sorghum hybrids producing lower values of both ϵ' and ϵ'' as compared to large-grain hybrids. The density-independent dielectric model which correlates grain sorghum moisture content with ϵ' and $\ln(\epsilon'')$ values, measured at 5 MHz, produced the best accuracy compared to the two other investigated models, yielding the highest value for the coefficient of multiple determination ($R^2 = 0.91$) and a low value for the standard error of calibration (SEC = 1.2).

1. INTRODUÇÃO

O teor de água dos grãos durante a colheita pode variar gradualmente ao longo dos dias ou das semanas, caso o processo dure o suficiente para que ocorram estas mudanças, ou pode alterar-se abruptamente quando se muda de um campo de cultivo para outro ou quando ocorrem fenômenos climáticos que alterem significativamente a umidade relativa do ar. Em unidades de pré-processamento de produtos agrícolas é comum a recepção de lotes de grãos provenientes dos mais diversos locais de cultivo e com diferentes teores de água.

Em situações em que ocorrem variações significativas no teor de água inicial dos grãos é possível demonstrar que a adoção de mecanismos de controle automático, na etapa de secagem, é um procedimento capaz de propiciar tanto um produto final mais homogêneo quanto de evitar o consumo excessivo de energia durante o processo (Stenning e Berbert, 1993; Liu e Bakker-Arkema, 2001). No entanto, a adoção de sistemas de monitoramento automático do processo de secagem, principalmente nos EUA e na Europa, tem ocorrido de forma mais gradual do que as pesquisas faziam supor. As razões desta ocorrência foram discutidas amplamente por diversos pesquisadores (Brooker et al., 1992; Liu e Bakker-Arkema, 2001; Dufour, 2006) e os problemas essenciais se resumem aos seguintes fatores:

- a) No caso dos sistemas de monitoramento do teor de água baseados na temperatura do ar de exaustão, a causa principal da ocorrência de falhas reside no fato de não haver uma relação bem definida entre o teor de água final do produto, na saída do secador, e a temperatura do ar de exaustão;
- b) Nos casos em que são empregados medidores elétricos portáteis de teor de água, a principal desvantagem advém do fato de eles serem capazes de avaliar apenas amostras localizadas e, portanto, não representativas da massa de sementes; e
- c) Nos sistemas onde se mede diretamente a variável controlada, ou seja, o teor de água do produto, a maior dificuldade, tanto nos medidores que operam em radiofrequências quanto naqueles que utilizam frequências de micro-ondas, deve-se ao efeito deletério da massa específica aparente das sementes. Conforme demonstrado por Kraszewski e Kulinski (1976), um grau maior ou menor de compactação das sementes, no compartimento eletricamente ativo do sensor, terá influência significativa no resultado final indicado pelo medidor.

Na agricultura moderna existem vários processos que poderiam se beneficiar do monitoramento automático e em tempo real (online) do teor de água de grãos e de diversos outros tipos de cultura. Na colheita de grãos, a estimativa confiável do teor de água à medida que o produto é colhido por máquinas colhedoras, é uma informação relevante para a determinação acurada da produtividade da cultura, informação que pode ser então associada à localização dos talhões por meio de tecnologia GPS (*Global Positioning System*) em agricultura de precisão. Esses mapas de produtividade podem então ser utilizados para aplicação mais eficiente de fertilizantes e demais produtos químicos, ou em qualquer outra atividade que possa melhorar a eficiência das operações agrícolas. No processo de moagem dos grãos e na produção de rações, o conhecimento do teor de água da matéria-prima é uma informação importante para que se alcance maior eficiência no processo e um produto final de melhor qualidade (Nelson, 2001).

Além do controle automático nos processos descritos anteriormente, a recepção e amostragem de sementes em unidades de beneficiamento de sementes (UBS) é outra atividade que poderia se beneficiar de um medidor que permitisse a avaliação contínua e em linha do teor de água dos produtos. Atualmente, devido à retirada de amostras localizadas, o manejo das UBS é baseado em valores médios do teor de água dessas amostras, podendo causar maior risco de deterioração (Lagares, 2009). A mistura de lotes de sementes secas e úmidas visando a obtenção de um produto com teor de água médio considerado adequado para uma armazenagem segura é uma prática comum tanto em fazendas como em grandes unidades de beneficiamento de sementes. Christensen e Kaufmann (1969) relataram experimentos realizados por diversos pesquisadores em que ocorreram perdas significativas do produto armazenado devido à presença de sementes com elevado teor de água na mistura de diversos lotes. Atualmente, utilizando-se métodos de amostragem convencionais, é praticamente impossível detectar a presença de sementes úmidas por meio dos medidores de teor de água existentes no mercado.

Várias metodologias têm sido propostas para reduzir ou eliminar a influência da massa específica aparente na determinação em linha do teor de água de produtos agrícolas. As soluções encontradas se baseiam, geralmente, na derivação de equações empíricas que correlacionem o teor de água dos grãos com sua permissividade elétrica relativa ϵ' e o fator de perda dielétrica ϵ'' e que sejam independentes da massa específica do produto, uma vez que seria muito difícil – senão impossível – controlar o fluxo de massa ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$) de uma coluna de grãos em movimento.

A permissividade elétrica relativa ϵ' e o fator de perda dielétrica ϵ'' constituem as partes real e imaginária da equação que define a permissividade complexa relativa, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = |\epsilon| e^{-j\delta}$, em que δ representa o ângulo de perdas do dielétrico. A permissividade elétrica relativa ϵ' é uma das propriedades fundamentais da matéria e está relacionada à capacidade que o dielétrico possui de aumentar a capacitância de um capacitor quando inserido entre suas placas, ou seja, é uma medida do grau de facilidade com que o material permite o

estabelecimento de um campo elétrico em seu interior. O fator de perda dielétrica ϵ'' está associado à quantidade de energia dissipada pelo dielétrico, quando submetido a um circuito de corrente alternada de alta frequência. Tanto ϵ' quanto ϵ'' podem ser excelentes indicadores do teor de água, dependendo do tipo de material e da frequência de oscilação do campo eletromagnético empregado nas medições (Nelson, 1992).

A maioria dos pesquisadores que buscam soluções para o efeito da massa específica aparente na determinação em linha do teor de água de produtos agrícolas tem concentrado seus esforços no desenvolvimento de medidores operando na frequência de micro-ondas (Meyer e Schilz, 1980; Kraszewski et al., 1997; Kim et al., 2002; Trabelsi et al., 2009; Digman et al., 2012). Argumenta-se que esses medidores teriam, em teoria, maior potencial para reduzir o efeito negativo da condutividade iônica da amostra devido à eliminação do contato físico entre os grãos e as células eletricamente ativas do medidor, o que não ocorreria, ou ocorreria em menor grau, nos medidores operando em radiofrequências. A redução da condutividade iônica propiciaria a obtenção de equações empíricas mais precisas. Esperava-se, também, que os custos envolvidos no desenvolvimento de produtos utilizando circuitos de micro-ondas sofressem reduções além das que realmente ocorreram nos últimos anos.

No entanto, é relevante observar que técnicas de estimativa do teor de água de grãos baseadas na medição da impedância de amostras em radiofrequências, ainda continuam a atrair o interesse de pesquisadores (Lawrence et al., 2001; Kim et al., 2003; Berbert et al., 2007; Funk et al., 2007; Kandala e Butts, 2007). Isto se deve, entre outros fatores, ao fato de que, com a escolha apropriada do tamanho e formato dos eletrodos, é possível medir o teor de água utilizando-se um volume considerável de sementes, resultando em uma leitura mais representativa. Acrescente-se a isto o fato de os custos para o desenvolvimento e a construção de aparelhos que utilizam circuitos operando em baixa frequência serem consideravelmente mais reduzidos que aqueles operando em frequências de micro-ondas, tornando-os mais atraentes para o eventual utilizador.

Para o desenvolvimento de um protótipo de medidor do teor de água de grãos e de demais produtos agrícolas em linha, é necessário, primeiramente, determinar as propriedades dielétricas de interesse, ϵ' e ϵ'' , de um número representativo de produtos, tais como grãos de cereais, de oleaginosas, de leguminosas e de café. De fato, as propriedades dielétricas de grãos de cereais como milho (Nelson, 1979; Sacilik e Colak, 2010), arroz (Noh e Nelson, 1989; Prasad e Singh, 2007), trigo (Nelson e Stetson, 1976; Berbert e Stenning, 1996) e cevada (Kim et al., 2003), de oleaginosas como soja (Lawrence et al., 2001; Trabelsi e Nelson, 2006), linhaça (Sacilik et al., 2006) e amendoim (Boldor et al., 2004), de leguminosas como o feijão (Berbert et al., 2002) e de grãos de café em pergaminho (Berbert et al., 2001), vêm sendo determinadas ao longo dos últimos 40 anos, utilizando-se tanto a técnica de radiofrequências como a de micro-ondas, como etapa preliminar na derivação de modelos dielétricos que possam estimar o teor de água de produtos agrícolas granulares em-linha e independentemente da sua massa específica aparente.

No entanto, dos principais cereais produzidos mundialmente, apenas os grãos de sorgo ainda não foram caracterizados quanto às suas propriedades dielétricas. De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), a cultura do sorgo – *Sorghum bicolor* (L.) Moench – no país apresentou expressiva expansão nos últimos anos, atingindo, na safra 2010/2011, área plantada acima de 817,4 mil ha, com o Brasil sendo o oitavo produtor mundial, com produção de 2,3 milhões de toneladas, valor que corresponde a 3,6% da produção mundial (Embrapa, 2010). A produção estimada para a safra 2011/2012 é de 2,2 milhões de toneladas, mantendo-se estável para 2012/2013, de acordo o primeiro levantamento da safra realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2012). Segundo dados Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, o sorgo é o quinto cereal mais importante do mundo em termos de produção (55,7 milhões de toneladas) e de área cultivada (40,5 milhões de hectares) (FAO, 2012).

Este crescimento, do ponto de vista agrônomo, é explicado, principalmente, pelo alto potencial de produção de grãos e matéria seca da

cultura, além da sua extraordinária capacidade de suportar estresses ambientais. Desse modo, o sorgo tem sido uma excelente opção para a produção de grãos e forragem em todas as situações em que o déficit hídrico e as condições de baixa fertilidade dos solos oferecem maiores riscos para outras culturas. Do ponto de vista de mercado, o cultivo de sorgo em sucessão a culturas de verão tem contribuído para a oferta sustentável de alimentos de boa qualidade para alimentação animal e de baixo custo, tanto para pecuaristas como para a agroindústria de rações. O avanço da moderna agricultura no Brasil e os seus sistemas de produção continuam ampliando as possibilidades para os diferentes tipos agronômicos de sorgo.

Para a inclusão do sorgo dentre as culturas que podem vir a ter seu teor de água estimado continuamente e em tempo real, independentemente da massa específica aparente, sem a necessidade de retirada de amostras localizadas e, portanto, permitindo a utilização de mecanismos de controle automático nas mais diversas aplicações associadas aos grãos, será necessário primeiramente determinar suas propriedades dielétricas. Posteriormente, será possível estabelecer as variáveis mais apropriadas, como o intervalo de teor de água, a frequência de excitação do campo eletromagnético e as propriedades dielétricas mais adequadas para integrarem os modelos dielétricos.

Para tornar o trabalho experimental mais eficiente, reduzindo significativamente o tempo para coleta e análise dos dados referentes às propriedades elétricas e dielétricas de amostras de sorgo, o primeiro objetivo do presente trabalho consistiu no desenvolvimento de um programa em LabVIEW que permitisse a determinação da permissividade elétrica relativa ϵ' , do fator de perda dielétrica ϵ'' e, conseqüentemente, da estimativa do teor de água de grãos de sorgo, independentemente da massa específica aparente das amostras, a partir de medições de capacitância e condutância feitas em medidor LCR de precisão HP 4285A.

Para correlacionar as propriedades dielétricas ao grau de umidade dos grãos de sorgo é necessário analisar detalhadamente a variação de ϵ' e ϵ'' em função da frequência, da massa específica aparente e da concentração

volumétrica de água na amostra contida no interior do sensor capacitivo. Esse procedimento permite antever que frequências e intervalos de teor de água e massa específica aparente poderão integrar os modelos dielétricos que se deseja avaliar. Sendo assim, o segundo objetivo do presente trabalho consistiu na determinação das propriedades dielétricas de grãos de quatro híbridos de sorgo (BRS 308, BRS 310, BRS 655 e CMSXS 769) para valores de teor de água no intervalo entre 7 e 23% b.u.¹, e massa específica aparente entre 575 e 819 kg m⁻³ para frequências entre 75 kHz e 5 MHz, empregando-se a coleta automática de dados por meio de software desenvolvido especificamente para esse fim.

Dos inúmeros modelos dielétricos existentes na literatura para estimar o teor de água de grãos em movimento e que não tenham influência da massa específica aparente, aqueles propostos por McFarlane (1987), por Kraszewski e Kulinski (1976) e por Lawrence e Nelson (1993), mostraram-se eficientes na determinação em linha do teor de água de grãos de trigo tanto em radiofrequências quanto em micro-ondas. Portanto, o terceiro objetivo do trabalho consistiu na análise da eficácia dos três modelos dielétricos mencionados anteriormente e a escolha daquele que descreve com o maior grau de acurácia o teor de água de grãos de sorgo de forma não destrutiva, em tempo real e independentemente da massa específica aparente, para condições semelhantes às aquelas estabelecidas para o segundo objetivo.

A tese será apresentada na forma de artigos científicos para publicação em periódicos nacional e internacionais. Dessa forma, o primeiro artigo, que corresponde ao primeiro objetivo da tese, intitula-se “Programa em LabVIEW para Estimar o Teor de Água de Sementes de Sorgo (*Sorghum Bicolor* L.)”. Este artigo foi escrito adotando-se as Normas para Elaboração de Tese, do Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal da UENF.

¹ Neste trabalho, o teor de água será sempre expresso em base úmida (b.u.).

O segundo artigo intitula-se “Frequency, Moisture Content, Bulk Density and Hybrid Effects on Grain Sorghum Dielectric Properties” e foi escrito de acordo com as instruções para elaboração de manuscritos do periódico *Drying Technology* (ISSN 0737-3937), publicado pela editora Taylor & Francis Ltd, Oxfordshire, UK. Este trabalho corresponde ao segundo objetivo da tese.

O terceiro trabalho, que atende ao terceiro objetivo da tese, corresponde ao artigo científico intitulado “Performance Analysis of RF Dielectric Models for Density-Independent Estimation of Moisture Content in Sorghum”. O artigo foi escrito de acordo com as instruções aos autores do periódico *Powder Technology* (ISSN 0032-5910), que aborda temas relacionados à tecnologia de sistemas particulados úmidos e secos e que é publicado pela editora Elsevier.

As únicas alterações feitas na formatação dos artigos submetidos aos periódicos internacionais consistiram na inserção de figuras e tabelas no corpo do texto de forma a facilitar a leitura.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. A cultura do sorgo

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é uma planta monoica pertencente à família Poaceae. É uma espécie basicamente autógama, com flores perfeitas e taxa de polinização cruzada em torno de 5% que ocorre, principalmente, pelo vento. Seu centro de origem é, provavelmente, a África Central, na região da Etiópia e do Sudão, entre 5 a 7 mil anos atrás ou mais, de onde se propagou por vários países, levado por nativos que migravam. O testemunho histórico mais antigo aparece em uma escultura no palácio do rei Senaquerib, em Nínive, Assíria, 700 a.C. (Pinho e Vasconcelos, 2002).

Sua estrutura radicular é composta por raízes que, por possuir sílica na endoderme, grande quantidade de pelos absorventes e altos índices de lignificação de periciclo, conferem à cultura maior tolerância à seca do que as demais. O caule por sua vez é dividido em nós e entrenós e folhas ao longo de toda a planta. Sua inflorescência é uma panícula e seu fruto é uma cariopse ou grão seco. Compreende espécies anuais e espécies vivazes. Atinge de 1 a 4 m de altura, tendo vários caules por pé (afilhamento), além de uma influência terminal do tipo paniculado em cada um deles. Uma espiga séssil, fértil,

acompanhada por duas espigetas estéreis pedunculadas são fatores que caracterizam o gênero (Albuquerque, 2009). Apresentam-se, na Figura 1, imagens da cultura do sorgo (cor avermelhada dos grãos) e, em detalhe, os grãos de coloração esbranquiçada.



Figura 1. Ilustração típica da espécie *Sorghum bicolor* (L.) Moench (grãos vermelhos) e detalhe mostrando grãos de sorgo de coloração .

Devido à sua capacidade de adaptação, tolerância a temperaturas elevadas é também uma planta adaptada ao processo de ensilagem, devido às suas características fenotípicas (Oliveira et al., 2005). A planta de sorgo se adapta a uma ampla gama de ambientes, principalmente sob condições de deficiência hídrica, desfavoráveis à maioria dos outros cereais (Diniz, 2010).

Estão disponíveis no mercado quatro tipos de sorgo: graníferos, forrageiros (tradicional ou silageiro e duplo propósito), vassoura e sacarinos. Estas cultivares variam na altura, produção de matéria seca e composição bromatológica, produzindo silagens com valores nutritivos diferentes. As cultivares graníferas variam de 1,0 a 1,6 m, com panículas bem desenvolvidas e grãos de tamanho grande produzindo silagens de valor nutritivo superior ao de silagens dos sorgos forrageiros de porte alto. Os sorgos do tipo forrageiros são adaptados para produção de silagem e para corte verde, com altura entre 2 e 3 m. Além disso, existem cultivares de duplopropósito (forragem e grão), com altura média em torno de 2 m. As cultivares de porte alto produzem silagens com valores nutritivos normalmente inferiores às de uma boa silagem de milho, devido a menor proporção de grãos na massa ensilada. O sorgo forrageiro apresenta grande

potencial para utilização, já que possui elevada produtividade, boa adequação à mecanização e grande versatilidade, podendo ser utilizado como feno, corte e pastejo direto e silagem (Rezende, 2010). Isso é possível porque o sorgo possui características fisiológicas que permitem paralisar o crescimento ou diminuir as atividades metabólicas durante o estresse hídrico e reiniciar o crescimento, quando a água se torna disponível. Além disso, logo após o término de um período de estresse hídrico, as plantas podem até crescer mais rapidamente do que as que não sofreram estresse. Essa situação ocorre, provavelmente, pelo acúmulo de fotoassimilados pouco utilizados no período de estresse, que ficam disponíveis para estimular o crescimento, quando a água se torna novamente disponível (Albuquerque, 2009).

Quanto ao emprego do sorgo na indústria, é principalmente a agroindústria de carnes que se expande em busca de matérias-primas de menor custo para alimentação de plantéis de aves, suínos e bovinos. A pecuária de leite e de corte se profissionaliza cada vez mais, à medida que os mercados consumidores de carne bovina exigem mais qualidade e preço competitivo. O milho, principal ingrediente para alimentação animal no país, está se valorizando, em especial pela grande expectativa de exportação do produto a granel ou embalado no complexo das carnes. Para manter o mercado de rações abastecido com grãos de qualidade confiável e custo ajustado ao negócio, o sorgo já é reconhecido como os principais grãos alternativos ao milho na chamada cesta básica de ingredientes forrageiros, junto com o próprio milho, estão o trigo, o triticale, o farelo de arroz e a fécula de mandioca.

O investimento na produção e na utilização do sorgo no Brasil justifica-se dentro da política estabelecida pelo Governo, que seria o aumento da eficiência, da qualidade e da competitividade dos produtores, e pelo conceito mundialmente aceito de agricultura sustentável. O sorgo pode substituir parcialmente o milho nas rações para aves e suínos, e totalmente para ruminantes, com vantagem comparativa de menor custo de produção e valor de comercialização de 80% do preço do milho. Além disso, a cultura tem mostrado bom desempenho como alternativa para uso no sistema de integração lavoura-pecuária e para produção de massa, proporcionando maior proteção do solo contra a erosão, maior

quantidade de matéria orgânica disponível e melhor capacidade de retenção de água no solo, além de propiciar condições para uso no plantio direto (Embrapa, 2010).

2.2. Classificação dos métodos de medição do teor de água em grãos

A umidade dos grãos é utilizada como importante parâmetro no manejo de produtos agrícolas, principalmente nas etapas de colheita e pós-colheita. Prova de tal importância é a ampla variedade de medidores de umidade desses produtos disponíveis no mercado, tanto importados quanto nacionais. Nelson et al. (2000) destacam alguns exemplos em que é importante conhecer o teor de água de produtos agrícolas:

- Avaliação do momento ideal para colheita mecanizada. A regulagem da colhedora é função, dentre outros fatores, da umidade dos grãos a ser colhidos;
- Condição para armazenagem, que deve ser feita com umidade controlada para evitar o aparecimento de fungos ou germinação indesejada;
- Determinação do valor de mercado dos grãos e sementes. Grãos e sementes úmidos necessitam passar por processo de secagem para posterior armazenagem. Este processo tem seu custo, que deve ser levado em conta por compradores de grãos úmidos; e
- Processamento de grãos para fabricação de farinhas e produtos para alimentação animal. As máquinas de processamento de grãos são projetadas para trabalhar eficientemente em uma faixa adequada de umidade das sementes.

Nelson et al. (1993) acrescentam que o teor de água também é importante no momento da venda de grãos e sementes. Como são vendidos em função da massa, é vantagem para o vendedor um teor de água tão alto quanto o permitido; ao passo que, para o comprador, será mais vantajoso um teor de água tão baixo quanto possível. Diante de tal importância, vários métodos de determinação de umidade foram desenvolvidos.

Cada método aplica-se melhor a determinada necessidade. Quando se fazem necessários resultados exatos, utilizam-se métodos diretos, como o método de estufa. Estes métodos, entretanto, são demorados, não se aplicando, por exemplo, a uma linha de produção. Nesse caso, têm-se à disposição outros métodos que oferecem resultados em segundos. É o caso dos medidores de umidade baseados na determinação das propriedades elétricas das sementes. São, contudo, mais adequados quando se quer uma análise mais qualitativa que quantitativa, ou quando a precisão dos resultados não é fator primordial.

Carvalho (1994) divide tais métodos em primários ou diretos, pelos quais se remove e se quantifica (por massa ou volume) a água contida nos grãos, e secundários ou indiretos, nos quais se mede alguma característica do grão que, de alguma forma, se relaciona com seu teor de água. Na primeira categoria tem-se a secagem em estufa e o cálculo da massa de água perdida por evaporação, a remoção de água por destilação e a medida do seu volume, a extração de água com solvente e a determinação da sua quantidade por meio de processos cromatográficos ou espectrofotométricos. Dentre os métodos secundários, destacam-se os baseados em propriedades elétricas e dielétricas dos grãos. Também podem ser citados: a higrometria; a espectroscopia de infravermelho ou de micro-ondas; a ressonância nuclear magnética; e as reações químicas.

No Brasil, o Ministério da Agricultura selecionou o método de estufa (método direto) como método padrão de medição de umidade (Brasil, 2009). Dessa forma, garante-se que os resultados obtidos nos diversos laboratórios sejam uniformes e comparáveis entre si. Trata-se de um método que possui rigorosa e bem definida metodologia, podendo, porém, durar mais de 24 horas.

Nelson et al. (2000) ressaltam, entretanto, que métodos como o citado anteriormente são muito demorados para uso comercial, sendo necessário recorrer a outros já desenvolvidos. Dos medidores de teor de água modernos que oferecem resultados rápidos, Nelson et al. (2000) relatam que a maioria trabalha com a leitura de propriedades elétricas e dielétricas dos grãos. Tais propriedades são altamente correlacionadas com o teor de água do produto.

Carvalho (1994) complementa que os métodos baseados em propriedades elétricas das sementes atingiram grande popularidade em virtude da rapidez e

facilidade com que são executados. São métodos baseados na medição da condutividade ou da capacitância de amostras de grãos localizadas no compartimento elétricamente ativo do medidor, sendo a capacitância uma propriedade de maior acurácia do que a condutividade, em virtude de não medir apenas a água existente na superfície da semente.

Knöchel et al. (2001), em seu estudo sobre o desenvolvimento de um sensor para medida instantânea do teor de água em gêneros alimentícios, afirmam que a determinação on-line de umidade tem ganhado importância em função do uso de métodos de produção cada vez mais rápidos. Instrumentos demorados de determinação de umidade mostram-se inadequados para o controle de qualidade em uma linha de produção. Destacam, ainda, que mesmo não sendo usados para fins regulatórios, existe a necessidade de desenvolvimento de instrumentação que permita rápida determinação do teor de água.

Knöchel et al. (2001) e Amoodeh et al. (2006) enumeram alguns métodos indiretos para medição de umidade em alimentos com aplicação on-line:

- Medidor de umidade radiométrico;
- Sensores resistivos;
- Sensores capacitivos;
- Sensor de ressonância magnética nuclear;
- Sensores ópticos; e
- Emissão acústica.

Existem outros métodos de medição de umidade, com princípios físicos diversos que não foram citados. Contudo, eles podem ser separados em uma das duas classes discutidas: métodos primários ou diretos e métodos secundários ou indiretos. Porém, em função de estar associado ao objetivo deste trabalho, o método indireto de medição do teor de água por meio do princípio capacitivo será discutido mais detalhadamente.

2.3. O princípio capacitivo: conceitos e definições

2.3.1. Capacitor

Trata-se de um dispositivo constituído por dois condutores, cada um tendo uma determinada superfície exposta ao outro, separados por um meio isolante. Uma diferença de potencial entre os dois condutores acarreta em armazenamento de cargas iguais em intensidade e de polaridades opostas. Os dois condutores são chamados eletrodos. Para Young e Freedman (2009), um capacitor é um sistema constituído por dois condutores separados por um isolante (ou imersos no vácuo).

2.3.2. Dielétrico

Halliday et al. (2009) definem dielétrico como um material isolante, que pode ser um plástico ou o óleo mineral. Para Young e Freedman (2009) o dielétrico é um isolante, e colocar um dielétrico sólido entre as placas de um capacitor possui três objetivos: em primeiro lugar, resolve o problema mecânico de manter duas grandes placas metálicas separadas por uma distância muito pequena, sem que ocorra contato entre elas; em segundo lugar, usando um dielétrico torna-se possível aumentar a diferença de potencial máxima entre as placas; e, em terceiro lugar, a capacitância de um capacitor com dimensões fixas, quando existe um dielétrico entre as placas, é maior do que a capacitância do mesmo capacitor quando há vácuo entre elas.

2.3.3. Dielétrico perfeito

É um dielétrico no qual toda a energia requerida para estabelecer um campo elétrico no mesmo é recuperada quando o campo ou a tensão aplicada é removida. Dessa forma, possui condutividade nula.

2.3.4. Dielétrico imperfeito

É aquele no qual uma parte da energia requerida para estabelecer um campo elétrico no dielétrico não retorna ao sistema elétrico quando o campo é removido. A energia é dissipada no dielétrico em forma de calor.

2.3.5. Capacitância

É a propriedade de um capacitor ou de um sistema de condutores e dielétricos que permite armazenar cargas separadas eletricamente, quando existem diferenças de potencial entre os condutores. Sensores capacitivos são largamente utilizados na indústria e em laboratórios para medição de diversos sinais físicos. Sensores de posição, velocidade angular, nível de líquido, umidade, aceleração e pressão são alguns exemplos. Tais sensores são construídos de modo que a variação do parâmetro a ser medido cause uma mudança do valor de capacitância do sensor (Preethichandra e Shida, 2001; Bracke et al., 2005).

Essa mudança do valor de capacitância pode se dar em função de mudança das características geométricas do capacitor ou da mudança do dielétrico utilizado. Segundo Callister (2007), um material dielétrico (ou simplesmente dielétrico) é aquele que, sendo um isolante elétrico, exibe estrutura de dipolos elétricos. Assim, existe uma separação de cargas positivas e negativas no material em nível molecular ou atômico. A interação entre os dipolos elétricos do material dielétrico com o campo elétrico aplicado a ele produz variações que, em um capacitor, resulta na variação de capacitância.

Quando uma tensão é aplicada aos eletrodos de um capacitor, um deles torna-se carregado positivamente e o outro negativamente, com o campo elétrico correspondente dirigido de positivo para negativo (Figura 2). A capacitância C é relacionada com a quantidade Q de cargas presente nas placas, conforme a Equação (1).

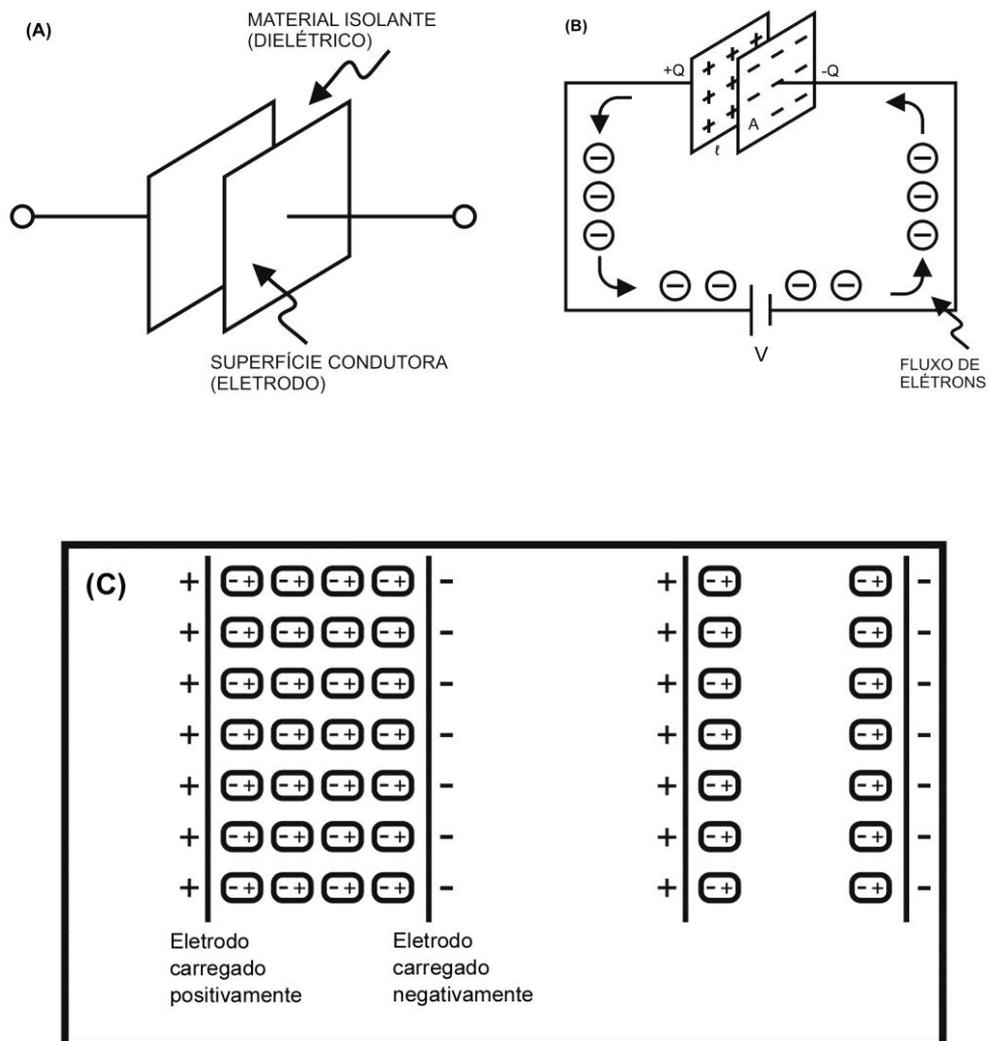


Figura 2. Capacitor de placas planas paralelas (A); capacitor de placas planas paralelas conectado aos terminais de uma bateria (B); e formação de dipolos no interior do dielétrico devido ao carregamento das placas de um capacitor (C).

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

em que:

Q = é a carga elétrica armazenada em Coulomb (C);

V = é a tensão aplicada no capacitor, em Volts (V); e

C = é a capacitância do capacitor em Farad (F).

Considerando um capacitor de placas paralelas, com vácuo na região entre as placas, sua capacitância pode ser calculada pela Equação (2). O parâmetro ϵ_0 , chamado de permissividade do vácuo, é uma constante universal, tendo valor igual a $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$. Se um material dielétrico é inserido na região entre as placas do capacitor tem-se a Equação (3).

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{\ell} \quad (2)$$

em que:

A = representa a área das placas; e

ℓ = a distância entre elas.

$$C = \epsilon_m \frac{A}{\ell} \quad (3)$$

em que:

ϵ_m = representa a permissividade desse meio dielétrico cuja magnitude será maior que ϵ_0 .

A permissividade elétrica ϵ , frequentemente chamada de constante dielétrica, é igual à razão ϵ_m/ϵ_0 , e representa a capacidade de armazenamento de cargas elétricas pela inserção de um meio dielétrico entre as placas de um capacitor (Callister, 2007). Substituindo-se o valor de $\epsilon_m = \epsilon \epsilon_0$ na Equação (3) tem-se:

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{A}{\ell} \quad (4)$$

Esta última equação mostra que a capacitância para capacitores de placas planas paralelas de área A e distância entre as placas ℓ é aumentada pelo fator ϵ quando o espaço entre as placas é preenchido por um dielétrico. É relevante mencionar que as equações anteriores para o cálculo da capacitância somente são válidas, a rigor, para capacitores de placas infinitas, de modo que as

distorções das linhas de força nas bordas do capacitor não existam. No entanto, estas fórmulas podem fornecer boa aproximação quando os valores de l são suficientemente pequenos em relação às áreas das placas, minimizando o efeito das distorções nas bordas.

A permissividade elétrica é uma propriedade do material de importância fundamental para o projeto de capacitores. Para exemplificar, apresentam-se, na Tabela 1, os valores de ϵ para alguns materiais.

Tabela 1. Permissividade elétrica de alguns materiais, à temperatura ambiente e em condições tais que o campo elétrico não varia com o tempo.

Dielétricos	Permissividade elétrica (ϵ)
Ar (1 atm)	1,00054
Poliestireno	2,6
Papel	3,5
Óleo de transformador	4,5
Pirex	4,7
Mica rubi	5,4
Porcelana	6,5
Silício	12
Germânio	16
Etanol	25
Água (20°.C)	80,4
Água (25°.C)	78,5
Titânia	130
Títanato de estrôncio	310
Vácuo	1

Fonte: (Halliday et al., 2009).

2.3.6. Absorção dielétrica

É o fenômeno que ocorre em dielétricos imperfeitos pelo qual cargas positivas e negativas são separadas e estão acumuladas em certas regiões dentro do volume do dielétrico. Este fenômeno manifesta-se, por si próprio, como uma corrente que decresce gradualmente com o tempo, após a aplicação de uma corrente contínua e constante.

2.3.7. Corrente de condução

A corrente de condução através de uma superfície em um dielétrico imperfeito é aquela proporcional ao gradiente de potencial. Ela não depende do tempo durante o qual o campo elétrico é aplicado ao dielétrico.

2.3.8. Polarização

Qualquer dipolo elétrico submetido a um campo elétrico tenderá a se alinhar na direção deste campo. Ao processo de alinhamento do dipolo dá-se o nome de polarização. Três tipos de polarização são citados por Callister (2007):

- Polarização eletrônica: pode ser induzida em maior ou menor grau em todos os átomos. Resulta do deslocamento do centro de cargas negativas da nuvem eletrônica de um átomo em relação ao centro de cargas positivas do núcleo deste mesmo átomo. Este tipo de polarização é encontrado em todos os materiais dielétricos e, é claro, existe apenas enquanto o campo elétrico está presente;
- Polarização iônica: ocorre somente em materiais que são iônicos. Um campo elétrico age no sentido de deslocar cátions em uma direção e ânions na direção oposta; e
- Polarização dipolar ou orientacional: encontrada apenas em substâncias que possuem dipolos permanentes. Resulta da rotação dos dipolos na direção do campo elétrico aplicado.

Em um material dielétrico podem ocorrer os três tipos citados de polarização, sendo a contribuição de cada tipo máxima, ou até mesmo nula, dependendo do tipo de material utilizado. Assim, como exemplo, a polarização iônica terá contribuição nula em materiais que apresentam ligação covalente, visto que não apresentam íons.

2.3.9. Frequência de relaxação

São comuns situações em que se tem uma tensão alternada aplicada a capacitores. Nessas condições, um material dielétrico apresenta características novas, conforme mencionado por Callister (2007) e reproduzido a seguir:

Considere um dielétrico submetido a um campo elétrico alternado. A cada mudança de direção deste campo elétrico, os dipolos presentes no material se reorientam em conformidade com a direção imposta pelo campo. Entretanto, o tempo para esta reorientação é finito e diferente para cada dielétrico e tipo de polarização. Assim, existe um tempo mínimo de reorientação que depende da “facilidade” com que cada dipolo do dielétrico é capaz de se realinhar. A frequência correspondente ao tempo mínimo necessário para que ocorra a reorientação dos dipolos de um material dielétrico submetido a um campo elétrico alternado dá-se o nome de frequência de relaxação (p. 360).

Um dipolo não consegue manter sua mudança de orientação quando um campo elétrico alternado excede a frequência de relaxação. Desse modo, este dipolo deixa de contribuir para a composição da constante dielétrica. Esta contribuição é melhor visualizada na Figura 3, que representa esquematicamente a relação existente entre a constante dielétrica e a frequência imposta por um campo elétrico alternado. Quando um mecanismo de polarização cessa de funcionar (devido à frequência de relaxação para aquele mecanismo ter sido atingida), ocorre uma queda abrupta do valor da constante dielétrica.

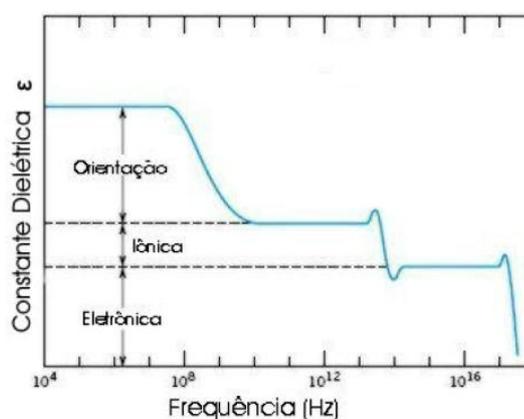


Figura 3. Tipos de polarização e sua contribuição para a constante dielétrica e as correspondentes frequências de relaxação.

2.3.10. Permissividade elétrica relativa ε' e fator de perda dielétrica ε''

A constante dielétrica ε definida no item 2.3.5 refere-se a um capacitor submetido a um campo elétrico que não muda de direção e sentido com o tempo. Para campos elétricos alternados, ε assume novos comportamentos físicos, sendo estudado sob a forma de um número complexo.

Nelson et al. (2000) definem ε como sendo a permissividade elétrica relativa ao espaço, ou, simplesmente, constante dielétrica complexa, que é dada pela seguinte equação.

$$\varepsilon = \varepsilon' - i \varepsilon'' \quad (5)$$

em que:

ε = permissividade elétrica relativa ou constante dielétrica complexa;

ε' = permissividade elétrica relativa;

i = denota a unidade imaginária de um número complexo; e

ε'' = fator de perda dielétrica.

Berbert e Stenning (1997) explicam as propriedades descritas anteriormente da seguinte maneira:

A permissividade elétrica relativa ε' de determinado material representa sua capacidade de armazenar parte da energia do campo elétrico, ao passo que o fator de perda dielétrica ε'' está associado à quantidade de energia dissipada pelo dielétrico quando submetido a um circuito de corrente alternada (p. 2).

O valor de permissividade complexa relativa depende do teor de água, da frequência de oscilação do campo eletromagnético, da temperatura, da massa específica aparente, bem como da estrutura e composição química do dielétrico, sendo frequentemente utilizada para caracterização de materiais.

Isso é particularmente aplicável em materiais particulados higroscópicos como solos e produtos agrícolas granulares, em que ε' e ε'' são altamente correlacionados com o teor de água dos materiais. Pode-se exemplificar uma aplicação prática dessas propriedades por meio do trabalho desenvolvido por Kizito et al. (2008) sobre medidores de umidade capacitivos para solos. Nesse trabalho, faz-se uma análise sobre a influência da frequência, condutividade elétrica e temperatura na calibração de um sensor de umidade.

Para grãos e sementes, pelo fato da constante dielétrica complexa também ser altamente correlacionada com seu teor de água, vários medidores de umidade eletrônicos, em que os recipientes de amostras nada mais são que capacitores de placas planas paralelas ou de cilindros coaxiais, têm sido desenvolvidos ao longo dos últimos 50 anos (Nelson et al., 2000).

A mudança da capacitância do recipiente (sensor) está diretamente relacionada com a permissividade elétrica relativa da amostra de grãos colocada no sensor. Tal mudança de capacitância fornece, portanto, um meio de se determinar, indiretamente, o teor de água da amostra de grãos.

O fator de perda dielétrica ε'' está relacionado à dissipação de energia elétrica sob a forma de calor do material dielétrico, dessa forma, de maneira irreversível.

2.4. Água em sementes: formas, forças e o fenômeno da sorção

A água desempenha papel básico no processo de germinação, razão pela qual uma semente, cujo tegumento não apresente qualquer tipo de impedimento, procura absorver água do meio ambiente (Carvalho, 1994). As sementes que se encontram com teor de água na faixa recomendada para o armazenamento (entre 11 e 13%) absorvem água rapidamente em virtude do baixo potencial hídrico que apresentam. Ao entrar na semente, a água estabelece ligação com as macromoléculas das partículas coloidais dispersas, ligação essa que se faz de diferentes formas em função do nível em que se estabelece e nas quais agem diferentes tipos de forças.

Trabelsi e Nelson (2004) classificam a água presente dentro de sementes em duas categorias: “água livre” e “água presa”. Este último termo é uma tradução do termo em inglês *bound water*, ou seja, trata-se da água ligada a macromoléculas na semente, conforme definido por Carvalho (1994). Do ponto de vista elétrico, a água líquida livre é bem descrita pelo modelo dielétrico de Debye (este modelo é detalhado no item 2.5.2). No entanto, pouco ainda se conhece sobre as propriedades dielétricas da “água presa”.

Em materiais granulares como grãos e sementes de cereais e oleaginosas, se espera vários modos de ligação da “água presa” às macromoléculas das sementes, dependendo da estrutura própria de cada tipo de semente, da quantidade de água disponível e da natureza das moléculas presentes.

De acordo com Carvalho (1994) existem na semente pelo menos três tipos de “água presa”. Tais tipos são definidos pela força (intensidade e tipo da força) com que a água se encontra ligada à superfície de macromoléculas. Esses tipos são os seguintes:

- a) Tipo 1: neste caso, a água está quimicamente unida às macromoléculas através de ligações iônicas, num processo ao qual os autores dão o nome de “quimisorção”. Trata-se de uma ligação muito forte em que a água age como um “ligand” (um grupo, íon, ou molécula ligada ao átomo central de um grupo de coordenação) e não como solvente;
- b) Tipo 2: este é o tipo de água que se condensa sobre sítios hidrofílicos de macromoléculas. É a partir deste tipo que a água passa a ter o papel de solvente e as propriedades que apresenta são muito semelhantes às de seu estado livre. A energia de ligação do tipo 2 é, evidentemente, bem menor em relação à do tipo 1;
- c) Tipo 3: neste tipo de união, a água estabelece “pontes” sobre sítios hidrofóbicos de macromoléculas, sendo esse o tipo mais fraco de união, apresentando, a água, as mesmas propriedades que quando em estado livre, ainda que alguns poucos parâmetros termodinâmicos mostrem alguma variação.

Estes três tipos de “água presa” representam um grau mais profundo de união, de sorte que as propriedades da molécula do produto absorvente e as da água interagem. O resultado final é que, quando unidas, ambas as moléculas se modificam, ficando diferentes de seus estados originais. Essa interação entre as duas substâncias (água e macromoléculas do sistema coloidal) recebe o nome geral de sorção e resulta tanto da entrada (adsorção) como da saída (dessorção) de água da semente.

A designação geral de água adsorvida (referente à “água presa”) difere-se de água absorvida. Nesta, as ligações são mais fracas, estando focalizadas nos espaços intergranulares e dentro dos poros do material. Na água absorvida atuam apenas forças capilares. A união água-semente seria tão fraca que a água, nessa condição, manteria todas as suas propriedades do estado livre. Nesse tipo de união, as moléculas do absorvente funcionam apenas como estrutura de suporte.

Carvalho (1994) também cita autores que sugerem as faixas de umidade com que a água se liga de diferentes maneiras. A “água presa” compreenderia teores entre zero e aproximadamente 27%. De 0 a 5% a água se encontraria como uma só camada de moléculas em torno das partículas coloidais, tratando-se de uma união muito forte, difícil de ser desfeita. Entre 5 e 13%, a água se encontraria no que o autor chama de camada polimolecular, ou seja, é uma camada que resulta da deposição de moléculas de água sobre moléculas de água. Acima de 13% (até 27%), a água que se prende à semente estaria em forma líquida, sob tensão osmótica. Acima de 27%, ter-se-ia a água livre.

As forças intermoleculares, também conhecidas como forças de van der Waals, são as responsáveis pelo fenômeno da adsorção. Segundo teorias correntes, essas forças teriam as seguintes origens:

- Efeito de orientação de dipolos permanentes ou efeito Keesom: segundo esta teoria, as forças intermoleculares surgiriam em razão de que a estrutura molecular de certas substâncias apresenta os centros de gravidade da carga positiva e da carga negativa não coincidentes. Esse distanciamento entre os dois centros de gravidade resultaria em um

momento dipolar permanente, ou seja, em certa “sobra de energia”. A água, o álcool e a amônia são bons exemplos de substâncias com momento dipolar constante;

- Efeito de momento dipolar induzido ou efeito de Debye: este é o caso em que as moléculas da substância considerada apresentam coincidência entre os centros de gravidade das cargas negativa e positiva. Essa estabilidade da molécula, contudo, é relativamente fraca e pode ser rompida facilmente quando essa molécula é colocada junto à outra que tenha um forte momento dipolar ou próxima de um íon ou de um campo elétrico. Nessa condição, a molécula, anteriormente estável, apresenta uma separação entre os centros de gravidade de suas cargas positiva e negativa, adquirindo um momento dipolar (induzido) e passando a apresentar, portanto, condições de realizar uma união do tipo adsorção; e
- Efeito de dispersão London: segundo esta teoria, o átomo de hidrogênio, representado por um núcleo ao redor do qual vibra incessantemente um elétron, possui um desequilíbrio energético devido a assimetria da posição do único elétron. Ao se aproximarem dois átomos de hidrogênio, se os elétrons começarem a girar em fase (ocupando os mesmos pontos relativos ao núcleo no mesmo momento), isso pode criar uma corrente de força; essa corrente de força – avança a teoria – pode funcionar como indutora de momento dipolar em moléculas vizinhas e, portanto, propiciar uma união do tipo adsorção.

2.5. Natureza da variação das propriedades dielétricas de grãos e sementes

As propriedades dielétricas de um material qualquer variam em função de vários fatores. Nelson (1991) enumera os principais fatores que influenciam tais propriedades:

- Quantidade de água presente no material (teor de água);
- Frequência de oscilação do campo elétrico alternado aplicado;

- Temperatura;
- Massa específica aparente; e
- Estrutura do material analisado.

Nelson (1991) destaca, ainda, que fatores como composição química e molecular de grãos e sementes devem ser considerados. No entanto, em materiais higroscópicos, como a maioria dos produtos agrícolas, o teor de água é geralmente o fator dominante.

2.5.1. Efeito do teor de água

As propriedades dielétricas da maioria dos materiais biológicos são altamente dependentes do seu teor de água. Esta influência deve-se ao valor relativamente elevado da permissividade elétrica relativa da água em relação ao valor correspondente para a matéria seca presente nesses produtos. A título de comparação, o ϵ' da água pura, exposta a radiofrequências, é de cerca de 80, enquanto que para o trigo com o teor de água de 12% e 1 MHz tem-se, aproximadamente, 4,5 (Berbert e Stenning, 1997).

Em seu estudo sobre a influência do teor de água nas propriedades dielétricas de sementes de trigo no intervalo de 500 kHz a 5 MHz, Berbert e Stenning (1997) observaram variação linear de ϵ' com o teor de água das sementes a 5 MHz. Para frequências mais baixas (0,5 e 1,0 MHz), existe um valor crítico de umidade (14%) acima do qual a taxa de variação de ϵ' eleva-se acentuadamente, mostrando um comportamento não linear (Figura 4). Com relação a ϵ'' , os valores abaixo do ponto crítico de umidade (14%) são praticamente independentes da frequência de oscilação do campo e do teor de água. Acima de 14%, tem-se comportamento não linear para qualquer valor de frequência (Figura 5). Os autores sugeriram que tais comportamentos seriam fruto de variações nas forças de ligação entre as moléculas de água adsorvidas na superfície dos microporos do material estudado, bem como das forças entre as moléculas de água adsorvida e as moléculas de vapor d'água.

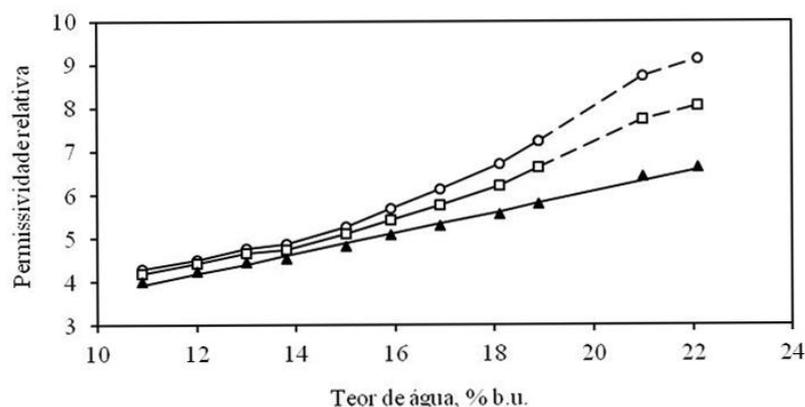


Figura 4. Variação da permissividade elétrica relativa, ϵ' , do trigo, variedade Mercia, em função do teor de água, para valores de massa específica ao redor de 800 kg m^{-3} , a $21 - 24^\circ \text{ C}$. O, 0,5 MHz; □, 1,0 MHz; ▲, 5,0 MHz. Fonte: Berbert e Stenning (1997)

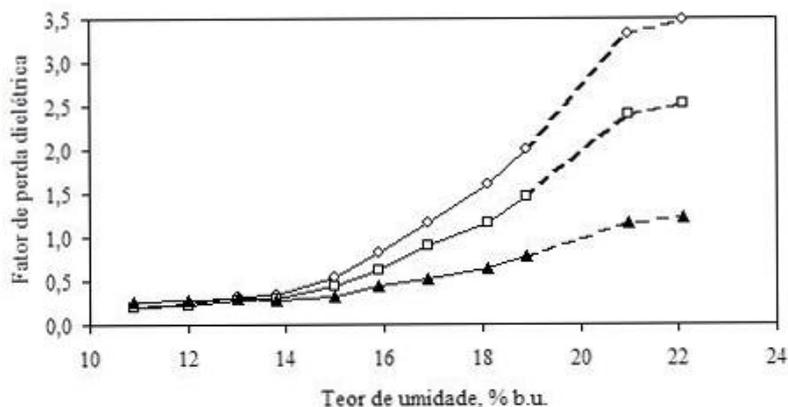


Figura 5. Variação do fator de perda dielétrica, ϵ'' , do trigo, variedade Mercia, em função do teor de água, para valores de massa específica ao redor de 800 kg m^{-3} , a $21 - 24^\circ \text{ C}$. O, 0,5 MHz; □, 1,0 MHz; ▲, 5,0 MHz. Fonte: Berbert e Stenning (1997).

Sacilik et al. (2007) estudaram as propriedades dielétricas das sementes de açafroa ou açafroa-bastardo (*Carthamus tinctorius* L.) e observaram variação linear de ϵ' para frequências acima de 5 MHz e comportamento não linear de ϵ'' em função do teor de água para qualquer frequência estudada (Figuras 6 e 7).

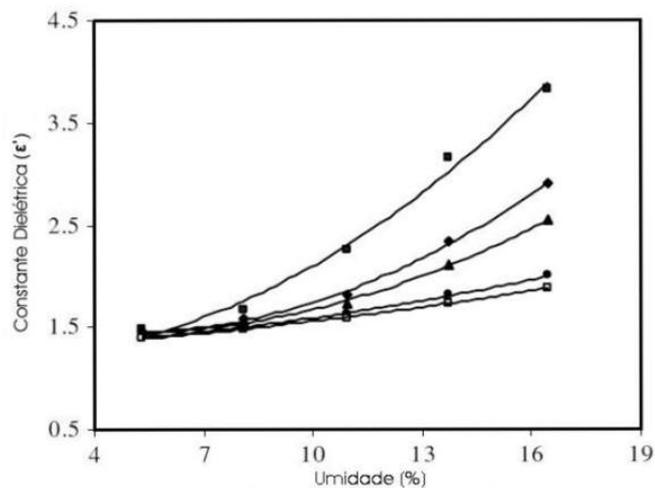


Figura 6. Variação de ϵ' com teor de água de sementes de açafreão-bastardo para valores indicados de frequência de oscilação do campo eletromagnético. ■, 100 kHz; ◆, 500 kHz; ▲, 1 MHz; ●, 5 MHz; □, 10 MHz. Fonte: Sacilik et al. (2007).

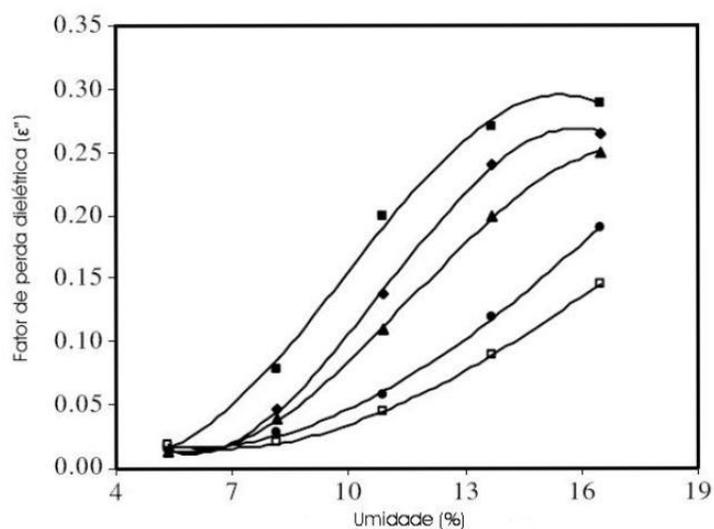


Figura 7. Variação de ϵ'' com teor de água de sementes de açafreão-bastardo para valores indicados de frequência de oscilação do campo eletromagnético. ■, 100 kHz; ◆, 500 kHz; ▲, 1 MHz; ●, 5 MHz; □, 10 MHz. Fonte: Sacilik et al. (2007).

Trabelsi et al. (1998) definiram ξ como uma função de calibração independente da massa específica aparente (ρ) dada pela Equação (6). Desse modo, para uma dada frequência, tem-se uma equação que correlaciona ε' e ε'' e que é independente da densidade (ρ). De acordo com os dados analisados pelos autores (Figura 8), a raiz quadrada da função ξ apresentou comportamento linear em função do teor de água para o trigo, a 14,2 GHz.

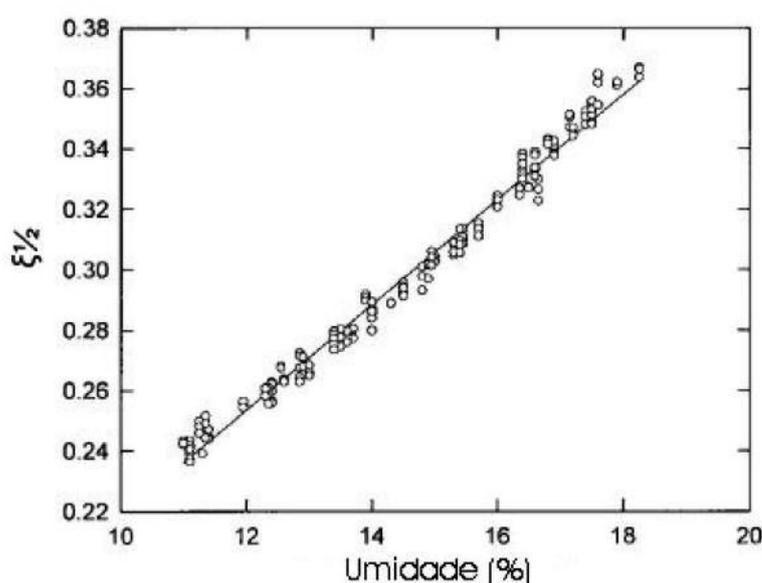


Figura 8. Raiz quadrada da função de calibração ξ , independente da massa específica aparente, em função do teor de água de sementes de trigo vermelho duro de inverno, a 14,2 GHz e 24 °C. Fonte: Trabelsi et al. (1998)

$$\xi = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'(a_f \varepsilon' - \varepsilon'')} \quad (6)$$

em que:

a_f = é o coeficiente angular de uma reta, sendo a_f função da frequência.

Nelson (1992) ilustra a variação linear de ε' do arroz em função do teor de água para frequências da ordem de MHz e GHz (Figura 9). Berbert et al. (2004)

encontraram, para o feijão, variação linear tanto de ϵ' como de ϵ'' , em relação ao teor de água, por frequência de 1 MHz (Figura 10)

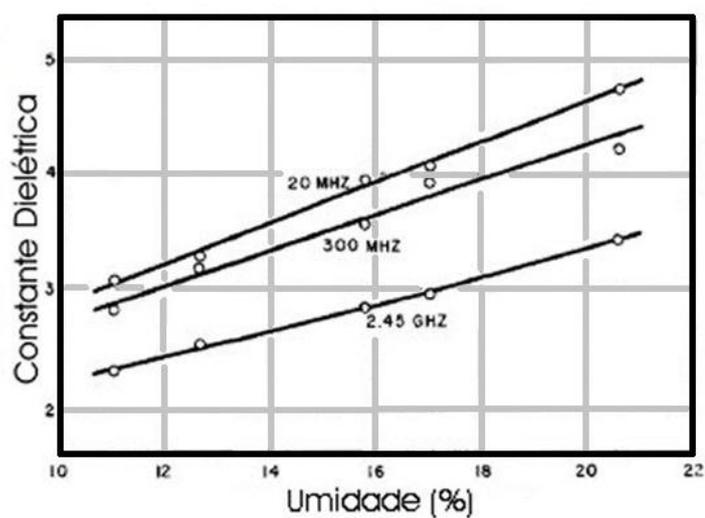


Figura 9. Variação da constante dielétrica ϵ' do arroz (*Oryza sativa* L.) em casca "Lebonnet" com o teor de água, a 24 °C, para valores indicados de frequência.

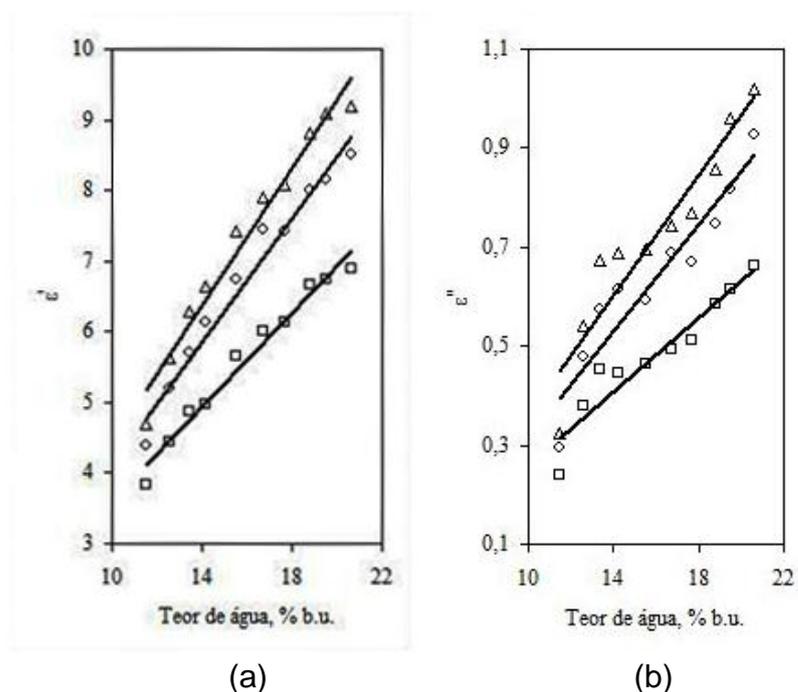


Figura 10. Variação de $\epsilon'_{1\text{MHz}}$ (a) e $\epsilon''_{1\text{MHz}}$ (b) em função do teor de água de sementes de feijão, variedade Campeão-3, para valores indicados de massa específica aparente a $20\pm 1^\circ\text{C}$ e $66\pm 2\%$ de umidade relativa. \square , 659 kg m^{-3} ; \circ , 800 kg m^{-3} ; \triangle , 844 kg m^{-3} . Fonte: Berbert et al. (2004).

Diante dos dados para trigo, arroz e feijão, pode-se notar uma tendência de linearização da constante dielétrica com relação à variação do teor de água quando as frequências aplicadas são da ordem de grandeza de MHz e GHz. Contudo, explicações mais detalhadas sobre a razão da linearidade da variação da constante dielétrica com o teor de água ainda não foram esclarecidas. Pode-se apenas supor que seja um fenômeno relacionado à forma como a água se liga no interior da semente com as várias moléculas ali presentes. É fato, no entanto, que a porcentagem de umidade presente em sementes é geralmente o fator dominante na dependência das propriedades dielétricas de produtos agrícolas – graças à notável diferença do valor de ϵ' da água pura com relação ao da matéria seca de sementes, como descrito no início deste item. Esta forte dependência

explica o sucesso do uso do princípio capacitivo para medição de umidade em sementes.

2.5.2. Efeito da frequência

Em sistemas capacitivos para medição do teor de água, é comum o uso de campo elétrico alternado. Nelson (1991) destaca um fenômeno importante para a explicação da variação das propriedades dielétricas de um material em função da variação da frequência: a orientação, induzida pelo campo elétrico alternado aplicado, de moléculas que possuem dipolos permanentes. Debye (1929) apud Nelson (1991) desenvolveu a formulação matemática que descreve tal fenômeno para substâncias puras polares, por meio da Equação (7).

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau} \quad (7)$$

em que:

ε_{∞} = permissividade elétrica em frequências altas o suficiente para que a orientação molecular não contribua com a polarização;

ε_s = permissividade estática (valor da permissividade a frequência zero);

i = $\sqrt{-1}$;

ω = frequência angular do campo elétrico alternado $\omega = 2\pi f$; e

τ = tempo de relaxação, período associado ao tempo necessário para que ocorra a reversão das moléculas de orientadas para orientação aleatória quando o campo elétrico é removido.

Separando a Equação (7) em suas partes real e imaginária, tem-se:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (8)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (9)$$

Portanto, para valores de frequências distantes da frequência de relaxação, a permissividade é constante (de valores ϵ_∞ e ϵ_s , respectivamente) e perda zero. Nas frequências intermediárias, ocorre o fenômeno da dispersão. A perda máxima ocorre na frequência de relaxação dada por $\omega = 1/\tau$. A Figura 11 ilustra graficamente as relações definidas pelas Equações (8) e (9).

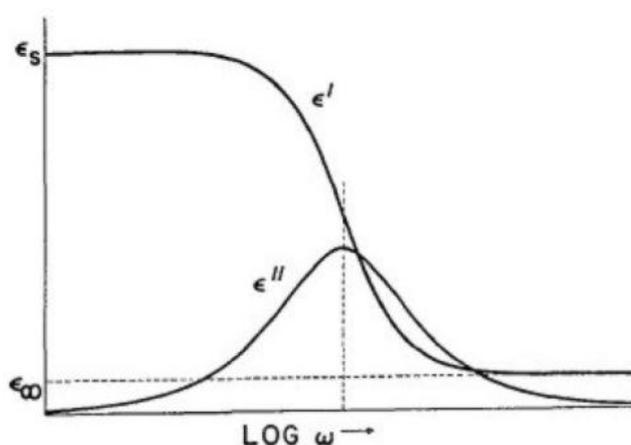


Figura 11. Curvas de dispersão e absorção representativas do modelo de Debye para substância polar com tempo de relaxação único. Fonte: Nelson (1991).

A equação de Debye pode ser representada graficamente em um plano complexo ϵ' vs ϵ'' como um semicírculo com domínio limitado pelos valores ϵ_∞ e ϵ_s (Figura 12). Esta representação é conhecida como diagrama Cole-Cole e ajuda na interpretação das Equações (8) e (9). Nos valores extremos de permissividade (ϵ_∞ e ϵ_s) não existem perdas (a relaxação é zero). Para valores intermediários de permissividade, as perdas comportam-se em acordo com a Figura 12.

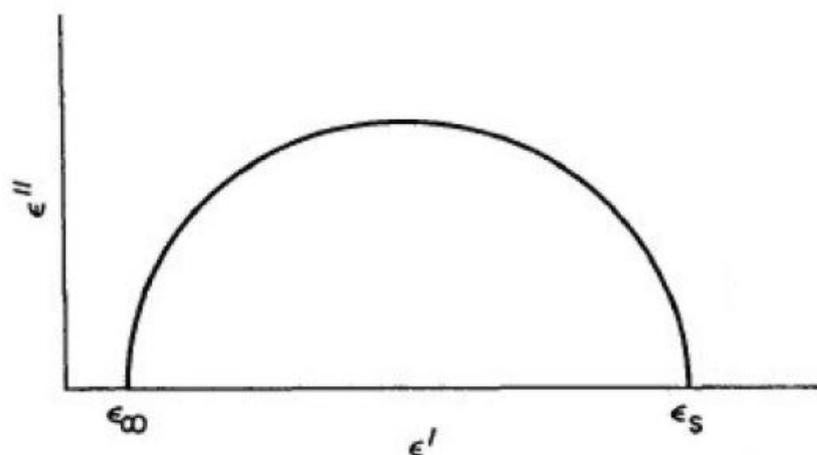


Figura 12. Diagrama Cole-Cole para substância polar com tempo de relaxação único. Fonte: Nelson (1991).

A teoria anterior descreve o comportamento da permissividade de uma substância pura (homogênea) constituída de moléculas polares. Este é o caso da água pura no estado líquido (obtida por destilação, por exemplo). Hasted (1973) apud Nelson (1991) descreve as propriedades dielétricas da água pura submetida a um campo elétrico alternado com frequências no campo das micro-ondas (Tabela 2).

Tabela 2. Propriedades dielétricas da água pura submetida a um campo elétrico alternado.

Frequência GHz	20 °C		50 °C	
	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
0,577	80,3	2,8	69,9	1,3
1,744	79,2	7,9	69,7	3,6
3	77,4	13,0	68,4	5,8
4,63	74,0	18,8	68,5	9,4
9,14	63,0	31,5	65,5	16,5
9,37	62,0	32,0	64,5	17,0
12,47	-	-	61,5	21,4
23,62	30,9	35,7	48,3	30,6
24,19	29,6	35,2	48,7	31,1
26,78	-	-	44,2	32,0
34,88	19,2	30,3	35,4	33,1
36,3	-	-	34,3	32,6
890	4,3	2,3	4,3	3,5

Fonte: Hasted (1973) apud Nelson (1991)

Apesar da água no estado líquido ser um bom exemplo de dielétrico polar puro, ela aparece muito raramente no estado livre em produtos agrícolas. Geralmente ela é absorvida fisicamente por capilaridade ou está ligada quimicamente com outras moléculas (Nelson, 1991).

Além disso, tais produtos – como é o caso de grãos e sementes – são misturas não homogêneas de diversos arranjos moleculares complexos, em que a água liga-se de diferentes formas, com diferentes energias de ligação. O resultado de tudo isso é a presença de várias moléculas e compostos com diferentes e desconhecidas propriedades dielétricas em um mesmo material (uma semente de milho, por exemplo). Portanto, é difícil modelar ou prever o comportamento dielétrico de tais produtos. Entretanto, como salienta Nelson (1991), o completo entendimento de tais propriedades não é necessário para a solução de problemas práticos. Ademais, tal dificuldade não impede o avanço nos estudos experimentais sobre o comportamento dielétrico das sementes.

Nesse contexto, Sacilik et al. (2007) estudaram a variação de ϵ' em função da frequência para sementes de açafrão-bastardo, para valores de teor de água no intervalo entre 5 e 12%, e dois níveis de ρ : valores naturais de massa específica aparente (ρ_0) e valores mais elevados de ρ , correspondentes a grãos compactados no elemento sensor (ρ_1). Para qualquer um dos valores de teor de água avaliados, a constante dielétrica diminuiu com o aumento da frequência do campo elétrico aplicado. Além disso, para um mesmo valor de teor de água, e para qualquer valor de frequência, quanto mais compactados estivessem os grãos no elemento sensor, maior o valor da constante dielétrica (ϵ'), como se pode observar na Figura 13. Com relação à variação de ϵ'' em função da frequência, o comportamento observado foi bem menos regular.

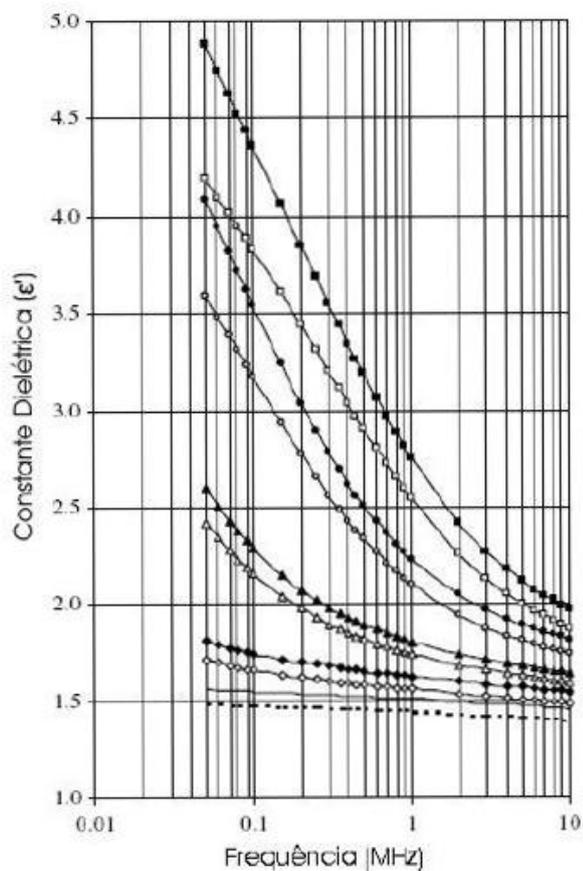


Figura 13. Variação da constante dielétrica em função da frequência para sementes de açafrão-bastardo para valores indicados de teor de água e massa específica aparente, ρ_0 (valor natural) e ρ_1 (valor para sementes compactadas). - - -, 5,1% (ρ_0); —, 5,1% (ρ_1); \diamond , 7,5% (ρ_0); \blacklozenge , 7,5% (ρ_1); \triangle , 9,8 % (ρ_0); \blacktriangle , 9,8% (ρ_1); \circ , 12,0% (ρ_0); \bullet , 12,% (ρ_1); \square , 14,1% (ρ_0); \blacksquare , 14,1% (ρ_1). Fonte: Sacilik et al. (2007)

O mesmo comportamento de ϵ' e ϵ'' em função da frequência foi observado para sementes de trigo em estudo feito por Nelson e Stetson (1976) apud Nelson et al. (2000) conforme ilustra a Figura 14.

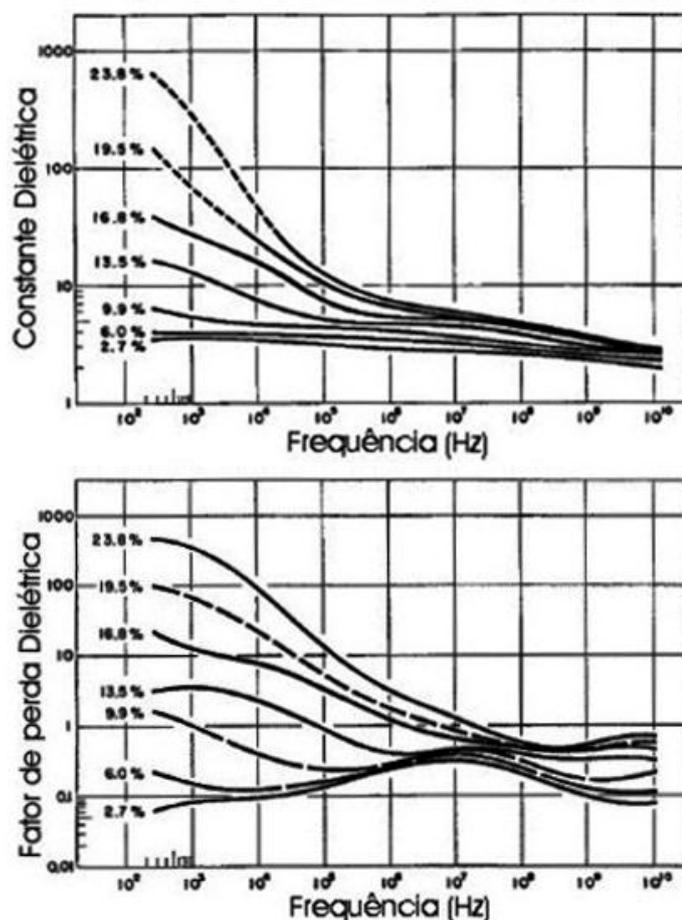


Figura 14. Variação de ϵ' e ϵ'' com a frequência para sementes de trigo a 24 °C. Fonte: Nelson et al. (2000).

Avançando no estudo do comportamento das propriedades dielétricas em função da frequência, Trabelsi et al. (1998) mostraram a dependência da função ξ de calibração independente da massa específica aparente ρ , como definido na Equação (6), com relação à frequência (Figura 15). Observa-se um discreto decréscimo de ξ com o aumento da frequência. Como ξ é uma função que relaciona ϵ' e ϵ'' , para um sensor projetado para operar em uma única frequência (da ordem de GHz), os autores sugerem que a seleção da frequência a ser utilizada deve basear-se em critérios como sensibilidade do sistema, forma e dimensão das sementes.

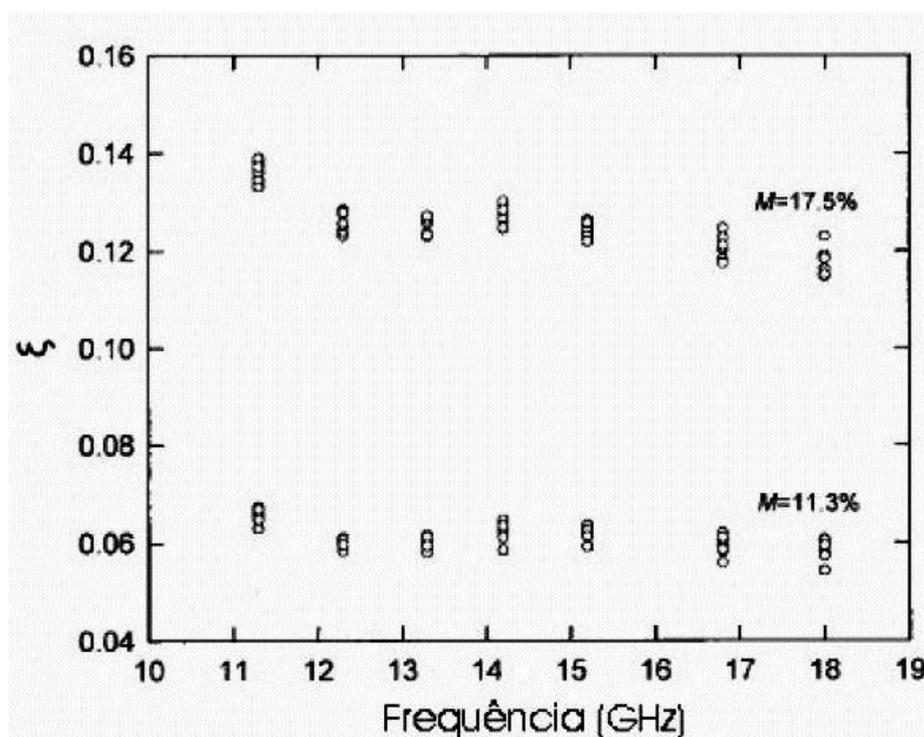


Figura 15. Variação da função ξ de calibração, independente da densidade ρ , em função da frequência, para sementes de trigo, a 24 °C, e valores indicados de teor de água. Fonte: Trabelsi et al. (1998).

2.5.3. Efeito da temperatura

As propriedades dielétricas de um material também dependem da temperatura. A natureza dessa dependência ocorre em função do processo de relaxação dielétrico que acontece sob as condições impostas ao material, como por exemplo, a frequência utilizada. Nelson (1991) explica que, com o aumento da temperatura, o tempo de relaxação diminui. Isso implica em um deslocamento do pico de perda (máximo valor de ϵ'' na Figura 11) para valores de frequência maiores. Portanto, em uma região de dispersão, a permissividade aumentará com o aumento da temperatura, enquanto o fator de perda pode aumentar ou diminuir, dependendo do valor da frequência de operação ser maior ou menor que o valor da frequência de relaxação. Para valores de ϵ' muito altos, sua dependência da temperatura pode ser desprezada.

Trabelsi e Nelson (2004) estudaram o comportamento de ϵ' e ϵ'' para sementes de trigo em função da temperatura, para frequência de 8 GHz (Figura 16) e observaram aumento no valor das propriedades dielétricas com o aumento da temperatura, para dois teores de água distintos. O aumento tem tendência linear até aproximadamente -20°C quando se então ocorre maior declividade para maiores temperaturas. Para temperaturas superiores a -20°C tem-se novamente uma tendência de comportamento linear, com maior inclinação para a amostra com maior teor de água. Os autores comparam este comportamento àquele da água pura, em que, a 0°C , também apresenta comportamento similar, porém mais acentuado. No caso da água, isto acontece devido à mudança de estado sólido para líquido. Para o trigo, sugeriram a existência de dois tipos de “água presa” com mudança de comportamento pronunciada em torno de -20°C .

Nelson (1991) considera o comportamento das propriedades dielétricas de sementes diante dos efeitos da temperatura e frequência bastante complexo. Sugere que, talvez, o melhor meio de se obter tais propriedades seja por meio da medição sob as condições de interesse.

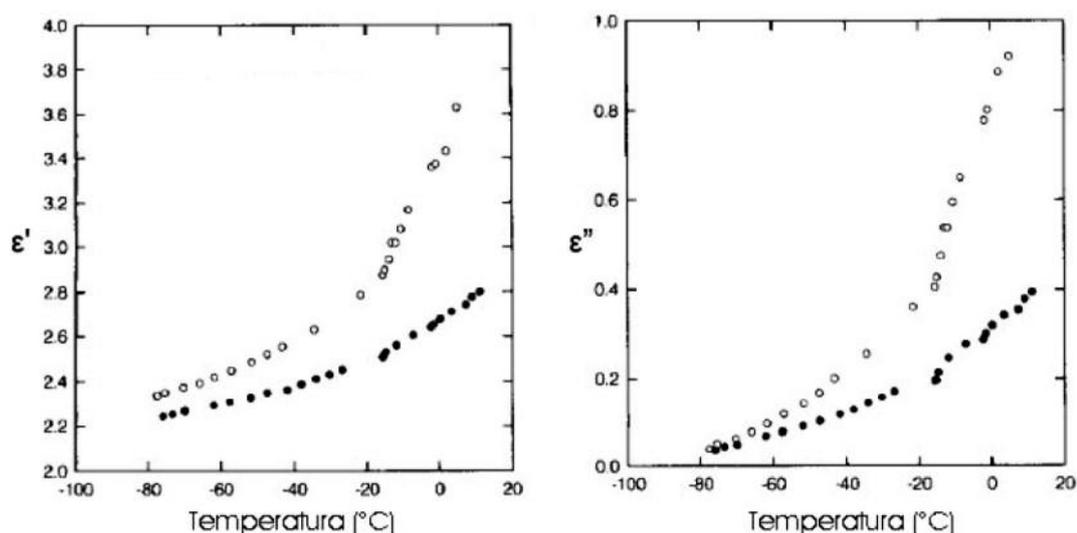


Figura 16. Variação de ϵ' e ϵ'' de sementes de trigo em função da temperatura, a 8 GHz, para valores indicados de teor de água. ● = 15,7%; ○ = 23,6%. Fonte: Trabelsi e Nelson (2004).

2.5.4. Efeito da massa específica aparente

A massa específica aparente de uma mistura ar/grão, ρ , depende da forma, dimensões, temperatura, umidade, estrutura e condições da superfície do grão (Kraszewski e Nelson, 1994). Adicionalmente, caso a medição seja executada em tempo real (onde existe um fluxo de sementes) toma forma de um problema sério a ser vencido. Dessa forma, Berbert et al. (2004) mostraram que, nas operações de controle automático de processos, a utilização de medições utilizando amostras estáticas vem sendo progressivamente substituída pela medição do teor de água do produto em movimento, sem a necessidade da retirada de amostras localizadas. Para tanto, sensores capacitivos operando em radiofrequência são considerados ferramentas adequadas.

A influência do dielétrico sobre o circuito em que se encontra inserido depende da quantidade de massa que interage com o campo elétrico aplicado. Assim, a razão entre a massa e a unidade de volume (massa específica) influenciará nas propriedades dielétricas. Isto é especialmente notável em dielétricos particulados (massa específica aparente).

Este é o caso das sementes que, dispostas em sensores apropriados para determinação do teor de água por meio do princípio capacitivo, apresentam grandes espaços preenchidos pelo ar presente no local. Dessa forma, ocorre uma interação da quantidade de ar presente na amostra de sementes a ser analisada. Esta quantidade de ar varia, de amostra para amostra, em função da disposição que tomam dentro do sensor, implicando em maior ou menor densidade média. Esta variação média de densidade constitui-se em fator de variação das propriedades dielétricas que, conseqüentemente, afetam os valores estimados do teor de água de uma amostra. Kraszewski e Nelson (1994) explicam este fenômeno da seguinte maneira: o teor de água fracionário das sementes, M , é dado pela Equação ((10)). A relação utilizada mais frequentemente é o teor de água relativo, em percentual, base úmida, dado por $M = 100 M_f$.

Define-se M como sendo o teor de água das sementes (em porcentagem, base úmida) dada por:

$$M = \frac{M_v}{M_\omega + M_d} \times 100 = 100\zeta \quad (10)$$

em que:

M_ω = é a massa de água contida nas sementes;

M_d = é a massa de material seco (massa de sementes secas); e

ζ = é a porcentagem fracionada de umidade.

Métodos padrão de determinação do teor de água, $M = 100 M_f$, baseiam-se na definição dada pela Equação (10) e exigem a determinação dos componentes m_a e m_{ms} . Esses componentes podem ser obtidos pelos métodos diretos de determinação do teor de água, que envolvem a evaporação de água contida no produto (método da estufa) ou sua destilação com posterior condensação. No entanto, métodos indiretos de determinação do teor de água (como o capacitivo), e que se baseiam na leitura de sinais elétricos, são influenciados não apenas pela concentração volumétrica de água no sensor, ζ , mas também pela massa específica aparente ρ . Como o sensor é preenchido por uma mistura ar/grão, variações de ρ influenciarão nos sinais elétricos, introduzindo uma fonte de erro. Um maior ou menor grau de compactação dos grãos (com o mesmo teor de água) contidos no elemento sensor implicará em maior ou menor concentração volumétrica de água e, conseqüentemente, em valores maiores ou menores de capacitância e condutância. Dessa forma, para um determinado valor padrão de teor de água, o sensor indicaria diferentes valores de teor de água, dependendo do grau de compactação do dielétrico.

2.5.5. Sensor capacitivo: características construtivas

Os sensores capacitivos atuais apresentam variação muito grande de forma e desenho, todos projetados para atender de maneira otimizada à aplicação

a que se propõem. Quando o produto a ser medido são grãos ou sementes, um dos pioneiros na elaboração de projetos e construção de protótipos para medição do teor de água desses produtos granulares foi Mathews (1963). Em seu trabalho, são discutidos vários fatores que influenciam no projeto de medidores com princípio capacitivo, incluindo o desenho do suporte para amostras, sendo sugeridos os de placas planas paralelas, cilindros concêntricos e base-colar de condução, conforme ilustra a Figura 17. Discutiu-se, também, o método de preenchimento dos sensores e os efeitos das propriedades das amostras na leitura do equipamento.

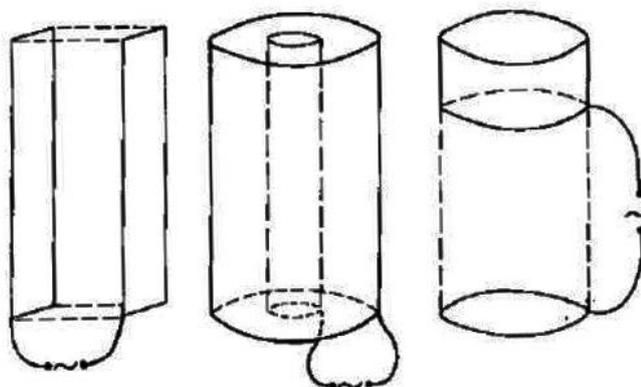


Figura 17. Ilustração de três possíveis configurações para o sensor capacitivo que contém as amostras durante a medição indireta do teor de água de produtos agrícolas granulares. 1. placas paralelas; 2. cilindros concêntricos e 3. base-colar de condução, nesta sequência. Fonte: Mathews (1963).

Algumas de suas conclusões são apresentadas a seguir:

- Suporte para amostras de aproximadamente $25-30 \text{ cm}^3$ podem ser usados com circuitos eletrônicos para medição de capacitância, da ordem de pF, a fim de construir um medidor de umidade simples e portátil;
- Conseguiu-se boa repetibilidade de leitura com amostras de até 20 g, sem ajuda mecânica de preenchimento do sensor; e
- A correção automática de temperatura mostrou-se exequível.

Tsamis e Avaritsiotis (2005) estudaram o projeto de um sensor capacitivo plano para monitoramento de umidade de produtos industriais em tempo real. Os

autores chegaram a um desenho com três eletrodos internos inseridos em uma câmara eletricamente aterrada suspensa sobre o material a ser monitorado. À medida que o material avança, caso haja uma variação do teor de água, o sensor é capaz de acusar tal variação.

Berbert et al. (1998a) classificaram como duas as configurações básicas normalmente utilizadas para construção de sensores capacitivos: capacitores de placas planas paralelas e capacitores de cilindros concêntricos. O sensor de placas planas tem a vantagem de apresentar uma distribuição uniforme das linhas de campo elétrico entre as duas placas. No caso de capacitores de cilindros concêntricos, a principal vantagem reside no fato do autoisolamento proporcionado quando o eletrodo externo é conectado ao fio terra (Kraus e Carver, 1973) apud (Berbert et al., 1998a).

Outra característica importante é o tamanho do capacitor. Para medições em amostras estáticas, considera-se adequado o capacitor que possua volume útil suficiente a ser preenchido por uma amostra representativa, obtida a partir da quantidade de sementes recolhidas em uma única etapa durante o processo de amostragem. De acordo com Berbert et al. (1998a), a experiência tem mostrado que volumes úteis de 20 a 25 cm³, eletricamente ativos, têm alcançado grau satisfatório de repetibilidade.

As características construtivas de sensores para medição do teor de água são mostradas a seguir. Berbert e Stenning (1997) construíram um capacitor de cilindros concêntricos para determinação das propriedades dielétricas de sementes de trigo conforme a Figura 18. O eletrodo externo do capacitor foi construído com tubo de latão com diâmetro interno de 85,2 mm e o eletrodo interno com tarugo de latão de diâmetro de 29,8 mm. Uma base anular (feita de politetrafluoroetileno, PTFE, mais conhecido como teflon) de 11,3 mm de espessura foi utilizada para manter os dois cilindros em posição concêntrica. O volume livre do capacitor é de $5,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, com capacidade aproximada de 0,45 kg de trigo com teor de água de 13%. A forma cilíndrica foi escolhida com a finalidade de facilitar sua utilização para medição em linha (fluxo de sementes) do teor de água de uma coluna de sementes em movimento.

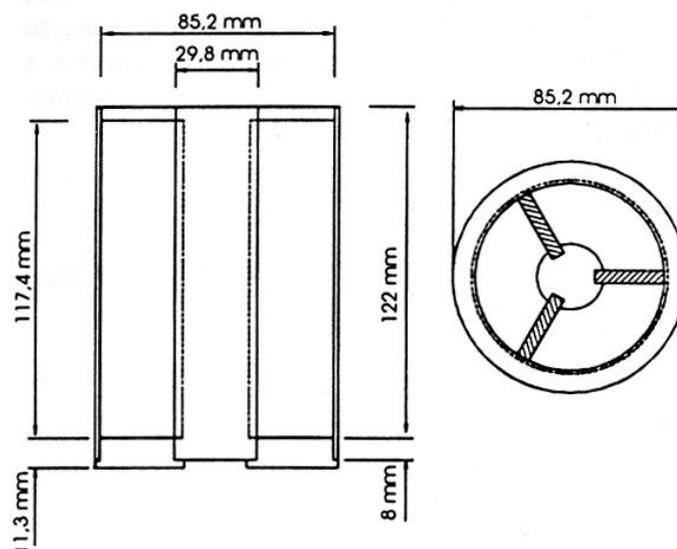


Figura 18. Desenho do capacitor utilizado por Berbert e Stenning (1997) para determinação das propriedades dielétricas do trigo.

Lawrence et al. (1999) construíram um sensor de placas planas paralelas como mostrado na Figura 19. O sensor contém uma placa central de alumínio (587 x 90 x 5 mm) e outras duas placas do mesmo material, externas (600 x 90 x 6 mm), todas conectadas a duas placas laterais especiais que transmitem os sinais elétricos a um analisador de impedância HP 4291A. A separação entre as placas é de 31 mm. Tal volume foi restringido por duas placas de poliestireno que limitou o volume útil para recepção das sementes a 850 cm³. Desenhado para trabalhar em uma faixa de frequências de 1 a 500 MHz, a forma de placas paralelas foi escolhida devido à simplicidade de geometria e sensibilidade a variações elétricas.

Existem, ainda, estudos que se dedicam a desenvolver equipamentos para medição do teor de água em apenas um grão ou semente. É o caso do trabalho de Nelson et al. (1993), em que construíram um sensor de placas paralelas constituído de eletrodos de latão de 20 mm de diâmetro para milho, 25 mm para amendoim e 50 mm para noz. A semente (ou noz) é levemente pressionada entre os eletrodos e a impedância é medida, de onde se obtém o teor de água.

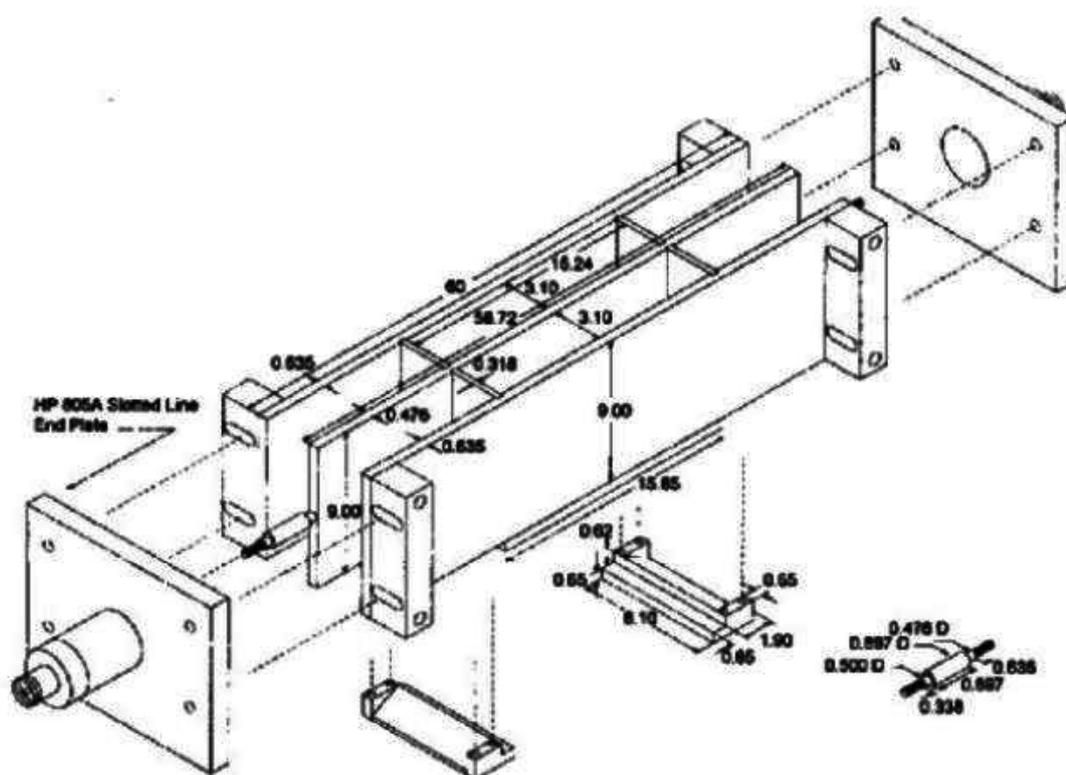


Figura 19. Desenho do capacitor utilizado por Lawrence et al. (1999) para determinação do teor de água do milho.

Berbert et al. (1998a) destacam, no entanto, que são poucas as informações disponíveis na literatura sobre os aspectos envolvidos e os problemas inerentes à construção de sensores para determinação do teor de umidade de sementes. Informações adicionais podem ser conseguidas em produtos patenteados. Existem diversas patentes relacionadas a medidores do teor de água de sementes. Ediger e Boelts (1990) inventaram um sensor de umidade capacitivo para uso em secadores de sementes, descrevendo o suporte para amostras e o circuito eletrônico de controle. A Figura 20. mostra o suporte para amostras instalado dentro do secador de sementes (constituído de um sensor capacitivo de placas paralelas).

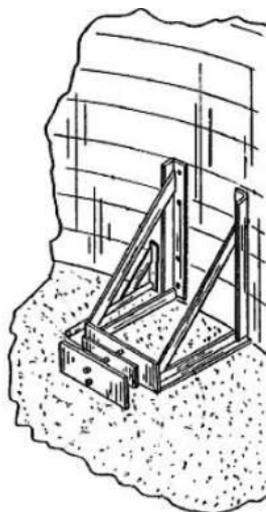


Figura 20. Desenho do capacitor desenvolvido por Ediger e Boelts (1990) para determinação do teor de água de sementes armazenadas em secadores.

O suporte para amostras é composto por um capacitor de placas paralelas de laterais abertas, visto que ficará permanentemente envolto em um volume de sementes estáticas. O sensor trabalha com a leitura das propriedades dielétricas das sementes (ϵ' e ϵ''). Estas propriedades estão relacionadas com a umidade por meio de uma equação determinada pelo autor (que também inclui a frequência de oscilação e a temperatura).

O diagrama de blocos da Figura 21 expõe a utilização de um oscilador, um detector de frequência (amplitude e fase), um sensor de temperatura, um conversor analógico/digital e um controlador lógico. O capacitor é parte de um circuito oscilador RC. Portanto, mudanças na capacitância provocam alteração na frequência de saída do oscilador que é captada pelo contador. O controlador toma esta informação junto com a temperatura e processa a leitura de umidade. A patente de Ediger e Boelts (1990) descreve um sensor de construção simples e robusta e baixos custos de construção, instalação e operação.

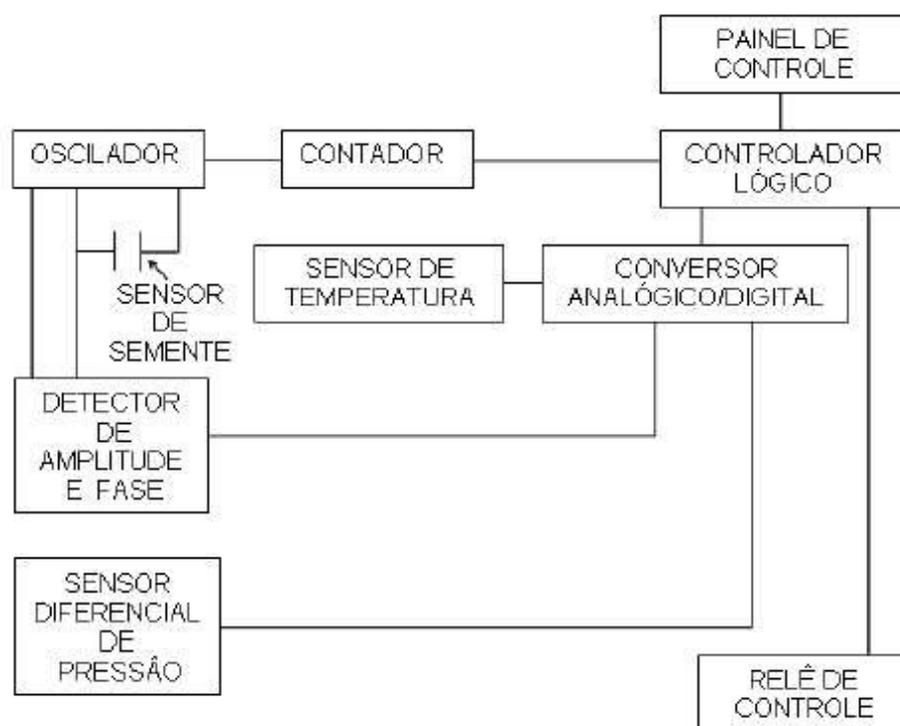


Figura 21. Diagrama de blocos do circuito eletrônico proposto por Ediger e Boelts (1990).

Satake (1983) descreve um sistema para incremento da precisão de leitura de umidade através de um aparato vibratório para acomodação das sementes dentro do sensor. É um sistema de aplicação geral, mas com enfoque na melhoria da leitura de umidade. Procura aumentar a massa de sementes que efetivamente participam do campo capacitivo por meio de sua compactação dentro do sensor por meio vibratório. Tal proposta, no entanto, leva a um dispositivo de construção relativamente complexa.

3. TRABALHOS

3.1. Trabalho 1: Programa em LabVIEW para estimar o teor de água de sementes de sorgo (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench)

RESUMO: O interesse nas propriedades dielétricas de grãos e sementes vem aumentando ao longo dos anos devido à sua potencial utilização em tecnologias avançadas, tais como a estimativa on-line do teor de água, independentemente da massa específica aparente, em processos de controle automático nas operações de colheita e secagem. Este artigo descreve um aplicativo desenvolvido na linguagem de programação gráfica LabVIEW, que integrado a um medidor LCR de precisão, permite determinar 12 parâmetros de impedância de amostras de grãos inseridas em um sensor capacitivo no intervalo entre 75 kHz e 5 MHz. A partir da medição de dois parâmetros de interesse, capacitância e condutância, é possível estimar duas propriedades dielétricas fundamentais do material granular, ou seja, sua permissividade elétrica relativa ϵ' e seu fator de perda dielétrica ϵ'' . A posterior correlação desses parâmetros com a concentração volumétrica da água presente nos grãos de sorgo contidos em um capacitor de

cilindros concêntricos, por meio de modelos dielétricos, permitiu estimar seu teor de água, sem a interferência da massa específica aparente, com o grau de acurácia exigido para fins de engenharia.

Palavras-chave: linguagem de programação gráfica, capacitância, condutância, permissividade elétrica relativa, fator de perda dielétrica, teor de água.

A LabVIEW program to estimate sorghum (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench) seed moisture content

ABSTRACT: Interest in the dielectric properties of grains and seeds has been increasing over the years due to their potential use in advanced technologies such as the bulk-density independent on-line monitoring of moisture content in automatic control systems in grain harvesting and drying operations. This work describes an application developed with the visual programming language LabVIEW, integrated to a precision LCR meter capable of measuring 12 impedance parameters, in the frequency range from 75 kHz to 5 MHz, of grain samples located inside a capacitive sensor. From measurements of two parameters of interest, capacitance and conductance, it is possible to estimate two fundamental dielectric properties of a granular material, i.e., its relative permittivity ϵ' and its dielectric loss factor ϵ'' . Following these measurements, the program uses these latter parameters to estimate moisture content of a sample of grain sorghum within a concentric cylinder capacitor using a predetermined dielectric model. These procedures allow bulk-density independent estimations of grain sorghum moisture content with the degree of accuracy to meet needs in engineering practice.

Key words: visual programming language, capacitance, conductance, relative permittivity, dielectric loss factor, moisture content.

3.1.1. INTRODUÇÃO

A medição rápida, exata e precisa do teor de água de grãos e sementes é importante nas operações de colheita, secagem, armazenamento, comercialização e processamento de produtos agrícolas. No entanto, a determinação do teor de água utilizando-se métodos-padrão, como os da estufa com convecção gravitacional ou forçada, é muito lenta, podendo, em alguns casos, se estender por até 72 h. Esse tipo de medição está se tornando satisfatório apenas para um número limitado de operações de rotina em unidades de manuseio de grãos. Em unidades armazenadoras de grande porte, devido ao considerável volume de grãos manipulados, é essencial a utilização de métodos indiretos, rápidos e não destrutivos para estimar seu teor de água; alguns desses métodos, como aqueles que empregam sensores capacitivos off-line e correlacionam o teor de água de amostras estáticas a determinado sinal elétrico gerado pelo medidor, têm sido usados satisfatoriamente há vários anos e são calibrados em função de métodos-padrão (Kraszewski e Nelson, 1991).

No entanto, seja durante a colheita ou no pré-processamento em unidades de secagem e armazenamento de grãos ou em indústrias de processamento de alimentos com alto nível de técnica, mesmo a medição do teor de água empregando-se os métodos elétricos off-line tradicionais, está se tornando obsoleta em determinadas atividades. Por exemplo, nas operações de controle automático de processos, verifica-se que a utilização de medições utilizando amostras estáticas vem sendo progressivamente substituída pela medição do teor de água do produto em movimento, sem a necessidade da retirada de amostras localizadas. De acordo com King (1995) os principais motivos para esse incremento na utilização de medidores on-line do teor de água devem-se aos seguintes fatores: 1) Informação em tempo real sobre o valor do teor de água, que permite a adaptação de diversos sistemas de controle, como proporcional (P), integral (I), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD), proporcional-integrativo-derivativo (PID) e lógica *fuzzy*, aos sistemas de secagem e em operações unitárias na indústria de alimentos; 2) Economia de energia, devido à redução no grau de supersecagem; 3) Eliminação de tarefas repetitivas e

entendiantes, como a retirada de amostras e a determinação do teor de água off-line, a intervalos curtos e regulares, permitindo a utilização da mão de obra em outras tarefas; 4) Obtenção de um produto final de melhor qualidade; e 5) Possibilidade de separação e classificação dos produtos de acordo com o seu teor de água.

No Brasil, a operação de controle da maioria dos secadores de fluxo contínuo é feita de forma manual, geralmente por meio do ajuste do fluxo de grãos na saída do secador. Os demais parâmetros, temperatura e fluxo do ar de secagem, são determinados previamente: o primeiro pelo operador do secador, tendo em vista a eventual utilização que o produto virá a ter; o segundo pelo fabricante do equipamento (Berbert e Stenning, 1997).

Durante a secagem, determina-se o teor de água do produto a intervalos regulares, geralmente a cada 30 ou 60 min, utilizando-se medidores elétricos. No entanto, observações feitas sobre o desempenho operacional nas instalações convencionais de pré-processamento de grãos demonstram que o controle da secagem é normalmente ineficiente quando os ajustes necessários para compensar as variações no teor de água inicial do produto são baseados apenas na experiência do operador (Berbert e Stenning, 1997).

Para evitar ajustes manuais frequentes ou tomadas de decisões que possam vir a comprometer a qualidade do produto, diversos fabricantes de medidores de teor de água de grãos e sementes têm desenvolvido sistemas de controle automático que utilizam métodos térmicos ou elétricos para a avaliação indireta e contínua do teor de água do produto durante a secagem. No entanto, a maioria destes sistemas não apresenta o grau de acurácia desejável nas operações de secagem do produto.

Para o desenvolvimento de secadores inteligentes (*smart driers*) é preciso, primeiramente, que o controlador automático seja alimentado diretamente com o valor da variável de processo, ou seja, o teor de água. Há um consenso generalizado entre pesquisadores de que essa estimativa acurada do teor de água de uma coluna de grãos em movimento só poderá vir a ser feita – em termos técnicos e econômicos satisfatórios – pela medição de duas propriedades fundamentais dos grãos e sementes, ou seja, sua permissividade elétrica relativa

ε' e seu fator de perda dielétrica ε'' . Estas propriedades representam as partes real e imaginária da permissividade relativa complexa de determinado material, $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$, que são fortemente correlacionadas ao seu teor de água. Diversos modelos matemáticos desenvolvidos a partir da medição simultânea desses dois parâmetros dielétricos em uma única frequência (Meyer e Schilz, 1980; Berbert e Stenning, 1998a; Trabelsi et al., 1999; Berbert et al., 2007) ou em duas frequências (Berbert et al., 2008) ou mesmo a medição de um único parâmetro dielétrico em uma única frequência (Funk et al., 2007), mostraram ser possível estimar o teor de água de uma coluna de grãos em movimento independentemente da massa específica aparente ou do fluxo de massa ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$).

Há diversos equipamentos e métodos que permitem a derivação de modelos dielétricos para estimar o teor de água de produtos agrícolas. Para frequências inferiores a 200 MHz, pontes de impedância e circuitos ressonantes têm sido tradicionalmente utilizados para caracterizar os sensores capacitivos, com e sem o dielétrico preenchendo o espaço entre os eletrodos, calculando-se posteriormente suas propriedades dielétricas (Nelson, 1992). A utilização de uma ponte de impedância HP 4285A foi utilizada com sucesso por Berbert e Stenning (1996) para medir os parâmetros dielétricos ε' e ε'' , a 0,5 MHz, e estimar o teor de água de sementes de trigo em movimento. Berbert et al. (1999) utilizaram a técnica de circuitos ressonantes, a 0,3 e 8,0 MHz, e um medidor do fator de qualidade Q para estimar o teor de água de amostras estáticas de sementes de trigo. Para frequências de 200 MHz até frequências de micro-ondas, têm sido úteis tanto o método da impedância em uma linha de transmissão composta por cabo coaxial do tipo N quanto a técnica de cavidades eletromagnéticas ressonantes (Nelson, 1992).

Mais recentemente, com o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos mais modernos, a medição das propriedades dielétricas tem se tornado cada vez mais eficiente. Por exemplo, Trabelsi et al. (2009) mediram a atenuação e o deslocamento de fase de ondas eletromagnéticas, entre 8 e 14 GHz, empregando

um analisador vetorial de redes HP 8510C, para estimar o teor de água de amendoim com erro padrão de calibração inferior a 1%.

O equipamento disponível para medição de parâmetros de impedância, $|Z|e^{j\theta}$, no Laboratório de Engenharia Agrícola da UENF é um medidor fabricado pela Hewlett-Packard, modelo 4285A, que opera no intervalo de frequências entre 75 kHz e 30 MHz. Todas as medições de capacitância (C, pF) e condutância (G, μS) feitas anteriormente com esse equipamento, empregando-se sementes de trigo, feijão e café, foram realizadas manualmente. Considerando que para a caracterização dielétrica de cada tipo de grão ou semente é preciso anotar valores de C e G em pelo menos 19 frequências de oscilação do campo eletromagnético, para nove valores de teor de água e cinco níveis de massa específica aparente, empregando três repetições, são necessárias, no mínimo, 5130 anotações. Isso torna o trabalho experimental enfadonho e extenso. Para conseguir derivar modelos dielétricos para a estimativa on-line de sementes de sorgo de forma mais eficiente, decidiu-se, portanto, automatizar a coleta dos valores medidos de C e G. A automação não deveria se restringir à simples coleta dos valores fornecidos pelo HP 4285A, mas propiciar, também, o cálculo de ϵ' e ϵ'' , para cada tratamento, além de permitir, a *posteriori*, o cálculo do teor de água do produto independentemente da massa específica aparente.

Dentre os ambientes gráficos de desenvolvimento de sistemas capazes de realizar os cálculos descritos anteriormente, optou-se pelo LabVIEW, da *National Instruments*. Esse software encontra-se comercialmente disponível desde 1986 e de acordo com Whitley et al. (2006) tem sido uma das linguagens de programação gráfica mais amplamente utilizadas por engenheiros e cientistas. Descrições aprofundadas do software podem ser encontradas em Johnson (1997) e em Wells e Travis (1996). A linguagem de programação LabVIEW baseia-se nos paradigmas de fluxo de dados e foi desenvolvida para facilitar a aquisição e a análise de dados visando o controle automático de processos em ambientes de instrumentação. Embora sua utilização seja um tanto mais específica quando comparada com a linguagem C, a aplicabilidade do LabVIEW é

consideravelmente mais ampla do que a de uma linguagem gráfica como a de relés e blocos (linguagem *Ladder*), que vinha sendo há muito tempo utilizada para a configuração de controladores lógico-programáveis (Whitley et al., 2006).

De fato, o LabVIEW tem sido empregado com as mais diversas finalidades na experimentação e instrumentação agrícolas, principalmente para fins de controle automático de processos. Li et al. (2009) utilizou-o para desenvolver um programa que determina a temperatura mais adequada de secagem por micro-ondas a partir da detecção e análise on-line dos voláteis que se desprendem do produto durante o processo. Chuang et al. (2011) desenvolveram um sistema de escaneamento por raios-X para detecção on-line de fases larvais de insetos no interior de frutas para utilização em serviços quarentenários. A aquisição automática de dados e o controle do processo foram feitos a partir de programa elaborado no ambiente LabVIEW. Aplicações do LabVIEW nas mais diversas atividades agrícolas podem ser encontradas em Rindler et al. (1998), Martynenko (2006), Morissette e Savoie (2008), Jafari et al. (2010), Ni e Heber (2010) e Samer et al. (2011).

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho consistiu no desenvolvimento de um programa em LabVIEW que permitisse a determinação da permissividade elétrica relativa ϵ' , do fator de perda dielétrica ϵ'' e, conseqüentemente, da estimativa do teor de água de grãos de sorgo, independentemente da massa específica aparente das amostras, a partir de medições de capacitância e condutância feitas em medidor LCR de precisão HP 4285A.

3.1.2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ.

3.1.2.1. Sementes de sorgo

Sementes certificadas de dois híbridos comerciais de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), BRS 308 e BRS 310, e de dois híbridos de sorgo forrageiro, CMSXS 769 (experimental) e BRS 655 (comercial), foram usados para medições das propriedades dielétricas. Os lotes de sementes foram fornecidos pelo Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa, após colheita, em 2011.

A fim de manter suas características originais, as sementes, inicialmente com teor de água de 13% b.u., foram armazenadas em sacos de polietileno em câmara a 4°C antes de qualquer condicionamento. O teor de água de amostras de 0,6 kg de cada híbrido foi artificialmente aumentado de 13 para 23% b.u. em incrementos de aproximadamente dois pontos percentuais de umidade, adicionando-se a quantidade requerida de água destilada. Para redução do teor de água de 13 para 7% b.u., as amostras foram secadas a 38°C, por diferentes períodos de tempo, em um protótipo de secador de camada fina.

Após os tratamentos de umedecimento e secagem, as amostras foram acondicionadas em frascos herméticos Kilner e armazenadas a 4°C. Os frascos eram revolvidos pelo menos três vezes ao dia para garantir melhor distribuição de umidade entre as sementes e em seu interior. Os frascos permaneciam por pelo menos 15 dias no ambiente refrigerado antes de serem retirados para a medição das propriedades dielétricas das sementes. Todas as medições foram realizadas à temperatura ambiente, $22 \pm 1^\circ\text{C}$, e $62 \pm 6\%$ de umidade relativa, respectivamente. A determinação do teor de água das sementes foi feita de acordo com as normas da *International Seed Testing Association* (ISTA, 2010).

3.1.2.2. Capacitor de cilindros concêntricos

O dispositivo utilizado para conter as amostras durante as medições das propriedades dielétricas das sementes de sorgo foi um capacitor de cilindros

concêntricos (Figura 1), construído por Berbert e Stenning (1998b). Para construção do eletrodo externo do capacitor utilizou-se tubulação de latão com diâmetro interno de 85,2 mm e o eletrodo interno foi construído usando-se um tarugo de latão com diâmetro de 29,8 mm. Para manter os dois cilindros em posição concêntrica, utilizou-se uma base anular de 11,3 mm de espessura construída de politetrafluoroetileno, conhecido pelo nome comercial teflon.

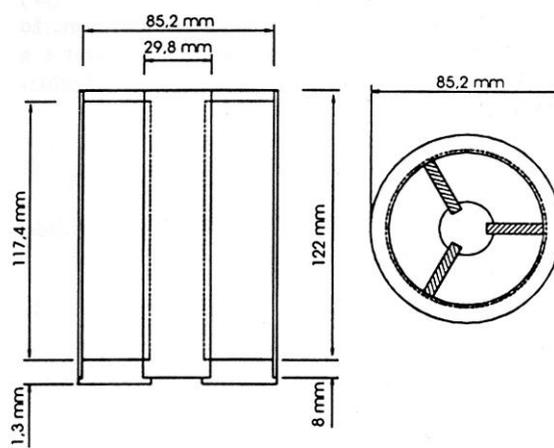


Figura 1. Capacitor utilizado na determinação das propriedades dielétricas de sementes de sorgo.

O capacitor foi projetado considerando-se que, no futuro, seria também utilizado para medições on-line do teor de água de uma coluna de grãos em movimento. Neste caso, para fixar os eletrodos e manter sua concentricidade, três peças retangulares de teflon foram firmemente ajustadas em cavidades abertas no eletrodo interno. Cada uma dessas peças foi fixada ao eletrodo externo por meio de dois parafusos de teflon. O volume livre do capacitor era de $5,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, sendo capaz de conter aproximadamente 0,41 kg de sorgo com teor de água de 13% b.u.

3.1.2.3. Hardware

A medição dos parâmetros elétricos das amostras, capacitância e condutância, foi feita mediante utilização de um medidor LCR, modelo 4285A, fabricado pela Hewlett-Packard, cujo painel frontal encontra-se ilustrado na

(Figura 2). Este equipamento é capaz de medir 12 parâmetros de impedância, $|Z|e^{j\theta}$, em frequências de teste de 75 kHz a 30 MHz. As propriedades dielétricas foram determinadas em incrementos de 100 kHz no intervalo entre 500 kHz e 1 MHz e em incrementos de 1 MHz no intervalo entre 1 MHz e 5 MHz, utilizando-se voltagem efetiva de $1,0 V_{rms}$. Utilizou-se a configuração com quatro pares de terminais para conectar o capacitor ao medidor HP 4285A. Este tipo de conexão minimiza os problemas relacionados com a indutância mútua, as resistências de contato e os ruídos elétricos.

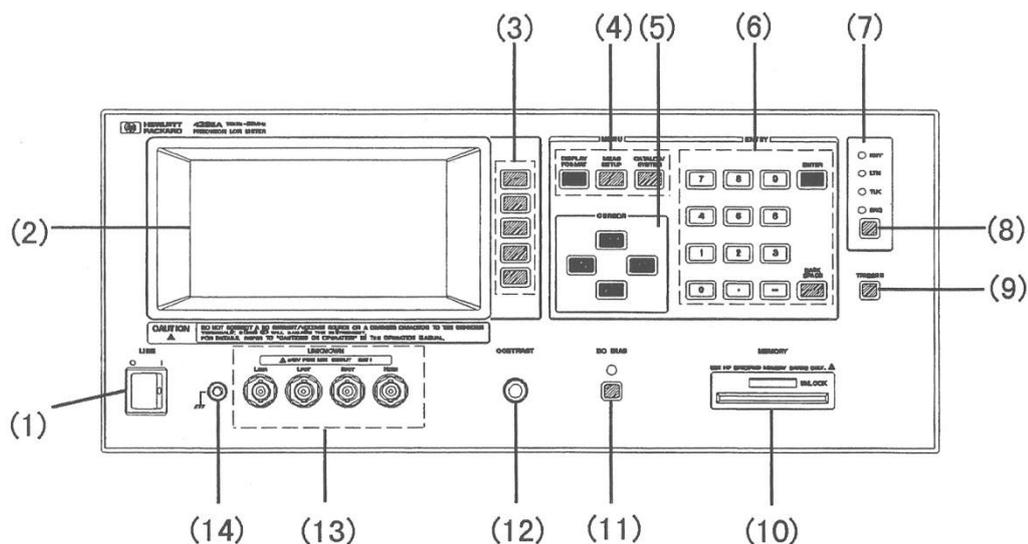


Figura 2. Painel frontal do medidor 4285A. (1) tecla liga-desliga, (2) painel LCD, (3) teclas para seleção de funções de controle, (4) teclas de *menu*, (5) teclas de cursor, (6) teclas de entrada de dados numéricos, (7) indicador do status do HP-IB, (8) tecla de retorno ao painel LCD, (9) tecla *trigger*, (10) *slot* para cartão de memória, (11) DC Bias, (12) botão para ajuste de contraste do painel LCD, (13) terminais para conexão do dispositivo que se deseja analisar e (14) terminal ligado ao chassi do equipamento, usado em medições que requerem blindagem.

A interface do HP 4285A é do tipo GPIB (*General Purpose Interface Bus*), conforme ilustra a Figura 3. O GPIB é um barramento IEEE-488, tendo sido especialmente concebido para a transferência de dados entre instrumentos.

3.1.2.4. Software

3.1.2.4.1. Linguagem LabVIEW

O LabVIEW é um software de programação gráfica utilizado em instrumentação virtual e que emprega a linguagem de programação denominada G, tendo a mesma funcionalidade de uma linguagem textual. Entretanto, em vez de utilizar comandos na forma de textos para gerar linhas de código, usa ícones interligados, formando um diagrama de blocos. Utilizando uma estrutura de programação orientada pelo fluxo de dados e hierarquia, o LabVIEW facilita a implementação de sistemas que utilizam aquisição e manipulação de dados ou ainda controle de equipamentos por meio do computador. O LabVIEW foi desenvolvido no final da década de 1980 pela *National Instruments* com foco em instrumentação virtual para ambientes de janelas do tipo *Windows*. LabVIEW é o acrônimo para *Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*.

3.1.2.4.2. Drivers do HP 4285A para o LabVIEW

A *National Instruments* disponibiliza drivers do HP 4285A para o LabVIEW por meio de instrumentos virtuais que fazem acesso aos drivers fornecidos pela Agilent Technologies através da *Agilent IO Libraries Suite*. A *Agilent Technologies* é a atual fornecedora de acessórios para o HP 4285A. Estes instrumentos virtuais formam a biblioteca *Agilent 428X Series*, possibilitando acesso às funções do equipamento. Esta biblioteca é dividida em quatro grupos que são: *action-status*, *configure*, *data* e *utility*. Cada grupo possui seu conjunto de funções (instrumentos virtuais) que fazem acesso ao *driver* da Agilent. Para efeito deste trabalho, os instrumentos virtuais serão chamados de programas, utilizando a nomenclatura mais comum na área de sistemas de informação.

3.1.2.4.3. Programa em LabVIEW para controlar o HP 4285A

O programa, além de ler as propriedades elétricas capacitância e condutância do capacitor preenchido ou não com as amostras de sorgo, medidas pelo HP 4285A, faz também o cálculo da permissividade elétrica relativa ϵ' e do fator de perda dielétrica ϵ'' das amostras. Esses cálculos estão descritos em detalhes em Berbert (1995). A interface do programa principal desenvolvido em LabVIEW pode ser observado na Figura 5. Este programa possui as seguintes funcionalidades principais, as quais serão explicitadas ao longo deste trabalho: (1) Controle, configuração e leitura dos valores medidos pelo HP 4285^a; (2) Cálculo de ϵ' e ϵ'' ; (3) Gravação dos valores no banco de dados; (4) Geração de planilha com os valores medidos e calculados; (5) Geração de arquivo texto com os valores medidos e calculados; e (6) Cálculo do teor de água a partir de modelo um modelo dielétrico específico.

The screenshot shows a LabVIEW front panel with a blue background. It contains various controls and indicators for configuring and running the HP 4285A measurement program. The controls include dropdown menus for 'Variedade' (SORGO-Branco-BRS 655), '% b.u.' (11%), 'Densidade' (D1), and 'Repetição' (R1). There are also buttons for 'Parar Leituras' (Parar) and 'Medições'. The VISA resource selection section shows 'Nome do Recurso VISA de Entrada' and 'Nome do Recurso VISA de Saída' both set to 'GPIB0::17::INSTR'. The measurement parameters section includes 'Imp Tipo' (CpG), 'Voltagem (V)' (1,0000), 'Tempo (Integ)' (Longo), and 'Média' (32). The correction section has checkboxes for 'Open', 'Short', 'Load', and 'Cabo', with 'Open', 'Short', and 'Load' currently set to 'Ligado'. The measurement status section shows 'Primeiro Valor' and 'Segundo Valor' both as '0,0000E+0', and 'Status da Medição' as a green indicator. The calculated results section displays 'Capacitância' (0,00), 'Condutância' (0,0000), 'Capacitância Vazio' (0,00), 'Condutância Vazio' (0,0000), 'Cap. Deformação' (-7,9768), 'Permissividade Relativa' (0,0000000000), and 'Fator de Perda' (0,0000000000). The error handling section has three sub-sections: 'Erro na Abertura', 'Erro na Leitura', and 'Erro Gravar Arquivo', each with 'status' and 'code' indicators.

Figura 5. Caixa de diálogo para interface do usuário com o programa principal.

3.1.2.4.4. Controle, configuração e leitura do HP 4285A

Esta funcionalidade do programa, demonstrada na Figura 6, é responsável pela interação com o instrumento de medição HP 4285A e, para tanto, foram utilizadas bibliotecas da *Agilent IO Libraries Suite* (Agilent Technologies). Conforme Figura (3), a interface do HP 4285A é um barramento GPIB, tornou-se necessário utilizar o conversor Agilent 82357B (Figura 4), que tem em uma extremidade uma conexão GPIB e na outra uma porta USB, que fica ligada ao computador. É neste bloco de comandos que são enviados ao HP 4285A as instruções sobre o tempo de duração de cada leitura, que pode ser breve, médio ou longo. O HP 4285A usa um conversor A/D do tipo declividades múltiplas para conversão do sinal analógico em digital. A escolha da duração da leitura está relacionada ao tempo de integralização do conversor A/D. Quanto maior for a duração de cada leitura, maior a acurácia do valor medido. Dessa forma, no presente trabalho optou-se que cada leitura fosse feita com o tempo de duração definido como longo.

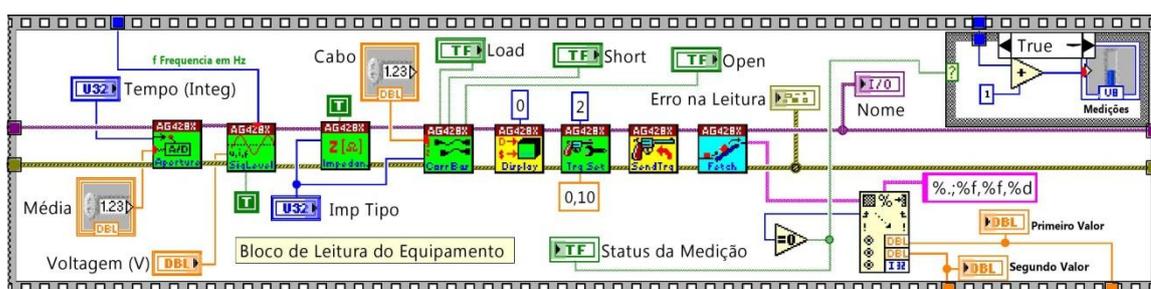


Figura 6. Controle, configuração e leitura do HP 4285A.

É também neste bloco que o programa envia o comando de quantas leituras sequenciais de cada parâmetro de impedância serão realizadas, para o posterior cálculo das médias pelo próprio instrumento de medição. Qualquer valor entre 1 e 256 medições pode ser estabelecido. No presente trabalho optou-se por utilizar a média de 32 leituras, buscando aumentar a acurácia dos valores de cada propriedade elétrica, para cada tratamento experimental (teor de água, massa específica aparente e a frequência de oscilação). O próximo comando enviado ao

4285A estabelece qual dos 19 pares de parâmetros de impedância será medido. No presente trabalho, mediu-se a capacitância (Valor 1) e a condutância (Valor 2).

Após esses comandos, são estabelecidas as configurações disponíveis no HP 4285A para correção de erros. A correção denominada *open field* elimina os erros devido à admitância $|Y|$ de fuga, composta pela condutância (G) e pela susceptância (B), existente entre o plano-referência em que é feita a medição e os pontos de contato em paralelo com o dispositivo que se deseja analisar, que nesse caso é o capacitor de cilindros concêntricos. Outra correção refere-se ao erro introduzido pelo comprimento do cabo utilizado para conectar o HP 4285A ao capacitor de cilindros concêntricos, que no presente caso foi de 1 m. Ao final do bloco no canto inferior direito, o resultado das leituras do Primeiro Valor ou Valor 1, que corresponde à capacitância, e do Segundo Valor ou Valor 2 que é a medida de condutância.

3.1.2.4.5. Cálculo de ϵ' e ϵ''

O bloco de comandos ilustrado na Figura 7 foi desenvolvido para calcular os valores da permissividade elétrica relativa ϵ' e do fator de perda dielétrica ϵ'' a partir dos valores medidos de C e G. A unidade da grandeza física C, inicialmente em Farad (F) é transformada para pF e, logo a seguir, faz-se um teste para verificação de erros, como a ocorrência de valores negativos de C. Isso pode ocorrer quando qualquer dos fios soldados aos dois terminais do tipo argola (*eyelet*), que ligam o capacitor ao 4285A, se rompe. Nesse caso, um sinal sonoro é acionado e o usuário fica ciente de que não deve continuar a coleta de dados sem recompor a solda. Esse procedimento evita que os valores espúrios só sejam detectados quando for feito o cálculo do teor de água.

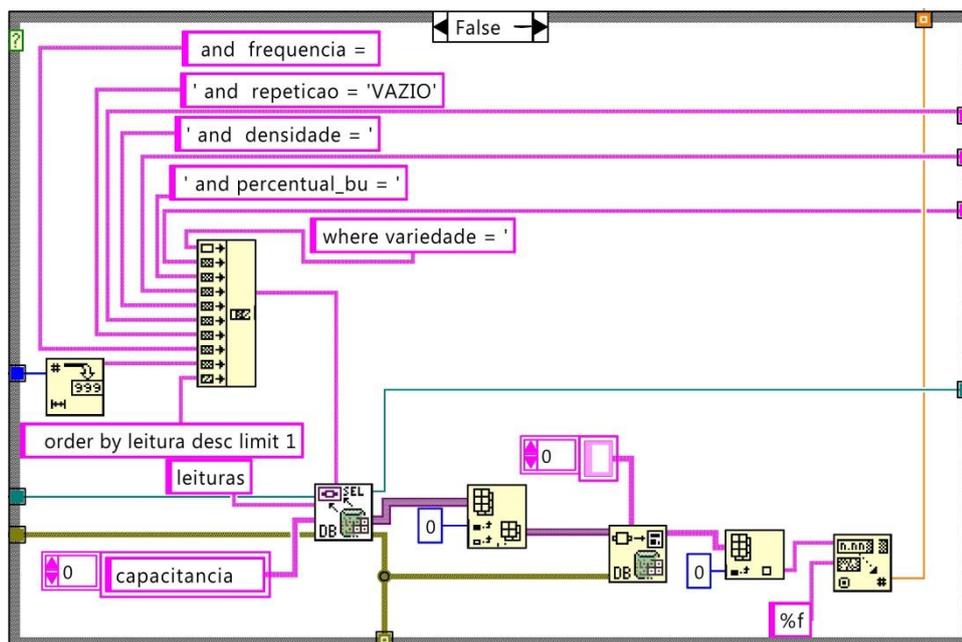


Figura 7. Cálculo da capacitância do capacitor vazio.

Os valores de ε' e ε'' são calculados de acordo com as Equações (1) e (2), respectivamente (Berbert et al., 1999). Os valores numéricos estão associados aos valores de capacitância introduzidos no elemento sensor pelos elementos de teflon que o constituem. Os procedimentos tanto para o cálculo de ε' quanto para o de ε'' estão descritos no subprograma mostrado na Figura 8.

$$\varepsilon' = \frac{C_m - C_f - 2.1873}{5.7896} \quad (1)$$

em que:

C_m = é o valor medido de capacitância; e

C_f = é a capacitância relacionada à deformação das linhas de campo nas bordas do capacitor.

$$\varepsilon'' = \frac{G_m - G_a}{\omega C_0} \quad (2)$$

em que:

G_m = é a condutância do capacitor preenchido com a amostra;

G_a = é a condutância do capacitor vazio;

- $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular do campo elétrico, em que f é a frequência (Hz); e
- C_0 = é a capacitância do capacitor vazio.

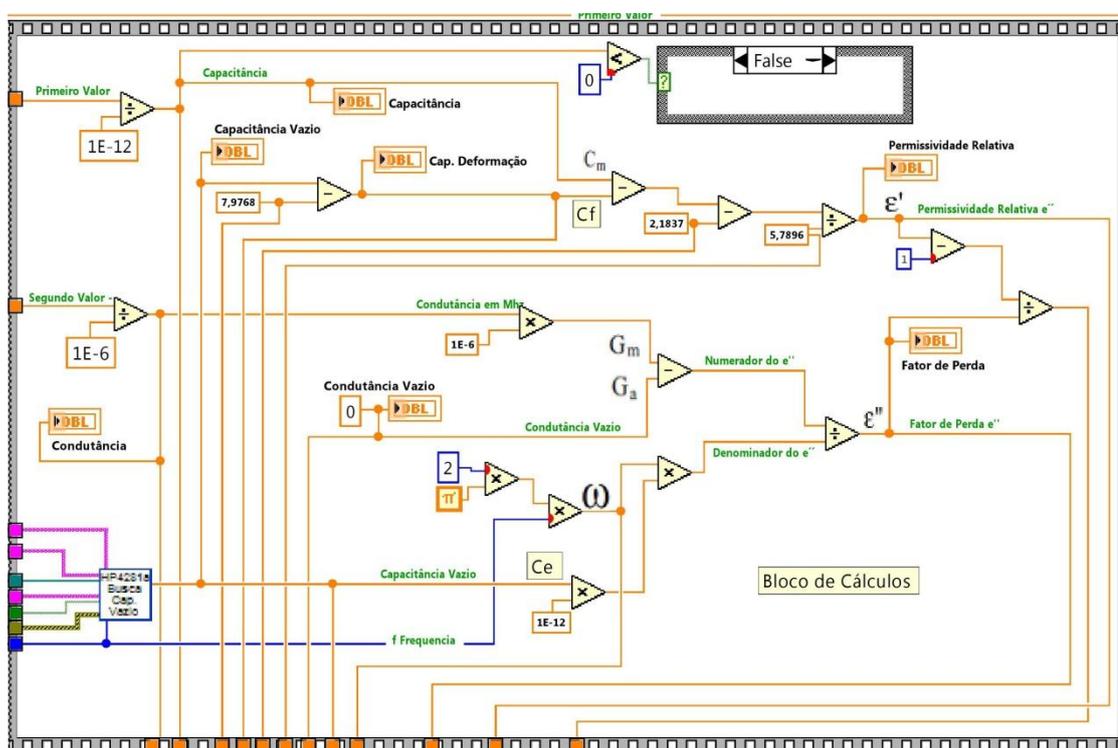


Figura 8. Subprograma para o cálculo de ϵ' e ϵ'' .

3.1.2.4.6. Armazenamento de dados

Terminados os cálculos de ϵ' e ϵ'' , tem início a fase do programa referente ao armazenamento dos dados, o qual é feito em arquivo texto. O bloco lógico desse subprograma encontra-se na Figura 9. Os valores também são armazenados no sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) PostgreSQL. O bloco lógico do subprograma que faz este armazenamento encontra-se na Figura 10. Além disso, o armazenamento é feito também em planilha Excel (Figura 11).

Adicionalmente, coletam-se dados da temperatura e umidade relativa do ambiente, assim como a massa da amostra de sorgo cujas propriedades dielétricas estejam sendo medidas (Figura 12).

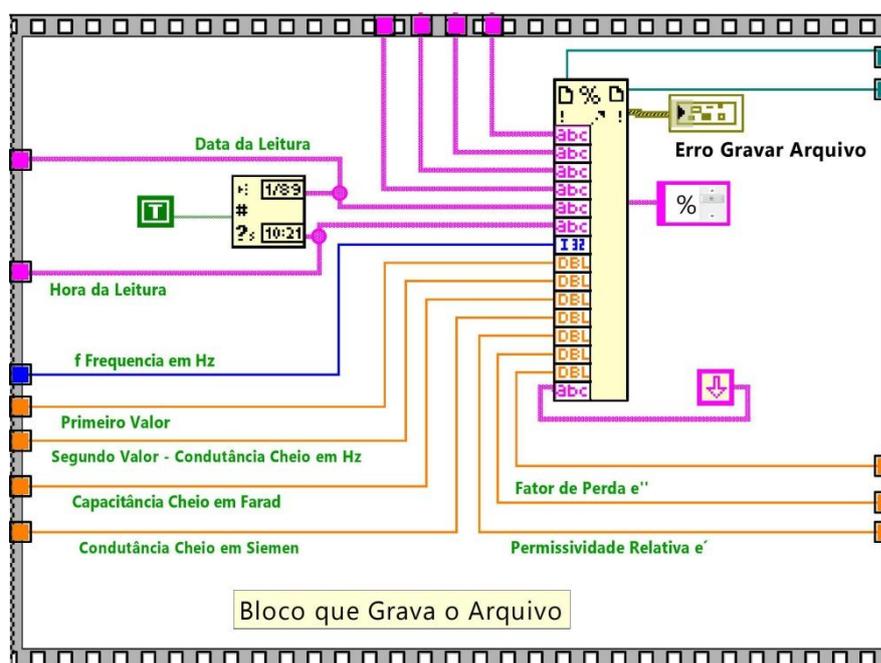


Figura 9. Subprograma para gravar em arquivo texto.

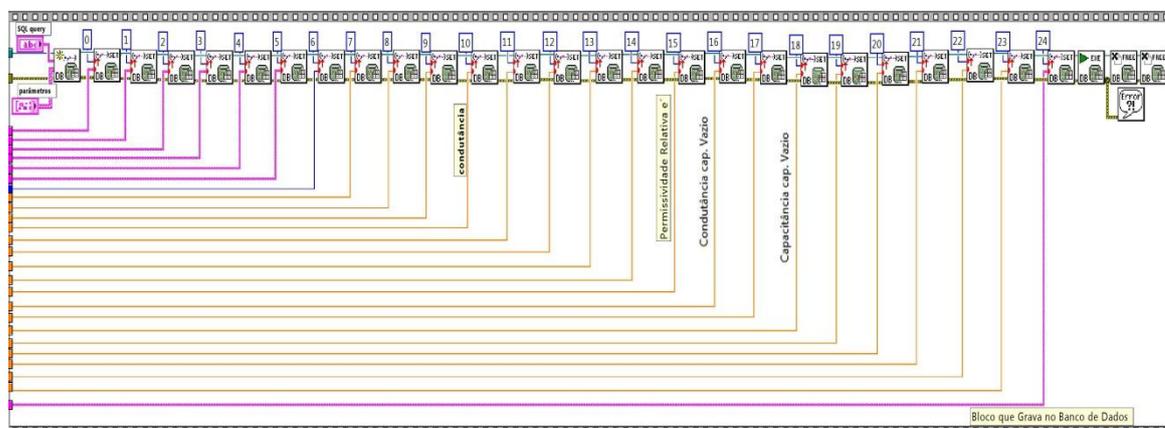


Figura 10. Subprograma que grava no SGBD PostgreSQL.

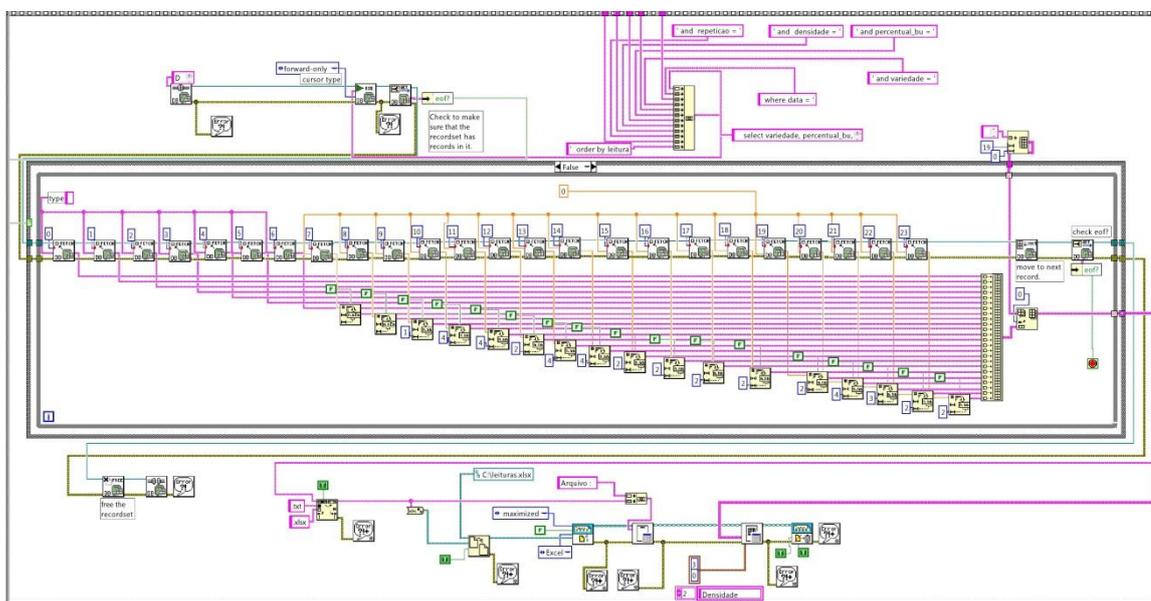


Figura 11. Subprograma que grava em uma planilha Excel.

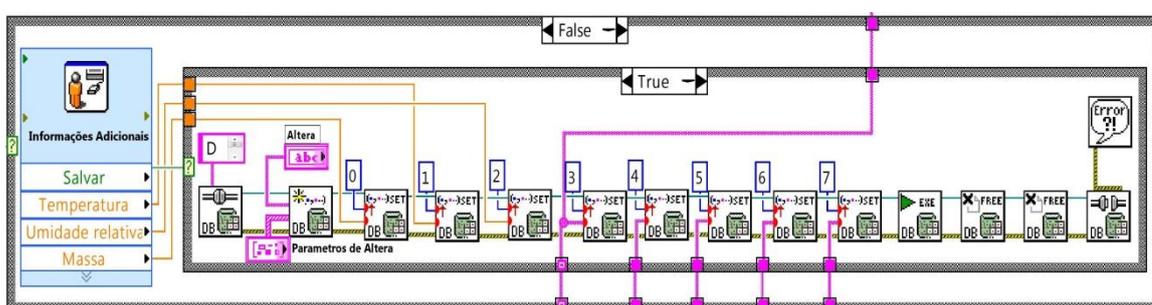


Figura 12. Coleta da temperatura, umidade relativa e massa da amostra.

3.1.2.4.7. Utilização do programa em LabVIEW para controlar o HP 4285A

O painel frontal do programa mostrado na Figura 5 ilustra os seguintes itens: (a) definição do tipo de híbrido ou variedade ou cultivar da semente cujas propriedades dielétricas serão medidas. Sementes de híbridos de sorgo BRS 308, BRS 310, BRS 655 e CMSXS 769; (b) o valor do teor de água das sementes calculado pelo método padrão da estufa; (c) o nível da massa específica aparente (ρ) da amostra, denominada “densidade” no programa. Para cada valor de teor de água, foram avaliados cinco níveis de massa específica aparente, ou seja, de D1 (menor ρ) a D5 (maior ρ); (d) a repetição que está sendo avaliada (R1, R2 ou R3); (e) o nome do recurso VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*) de entrada,

ou seja, o equipamento no qual serão feitas as medições); (f) o nome do recurso VISA de saída, ou seja, o equipamento para o qual serão enviados os dados e as configurações); (g) o par de parâmetros de impedância, dentre os 19 disponíveis, que o equipamento deve medir. Mediu-se a capacitância C_p (circuito equivalente em paralelo) e a condutância G ; (h) o nível da voltagem do circuito. O HP 4285A permite medidas no intervalo entre $5 \text{ mV}_{\text{rms}}$ a 2 V_{rms} . Optou-se pela aplicação de tensão de 1 V_{rms} ; (i) escolha do tempo de duração de cada leitura e pelo tempo de duração longo, para obtenção de valores mais acurados; (j) quantidade de medições que será feita em cada leitura do parâmetro elétrico escolhido (de 1 a 256). O valor final corresponde à média de 32 medições; (k) o tipo de correção para obtenção de valor mais acurado de uma determinada medição. Conforme mostra a Figura 2 (item 13), há sensores que podem ser conectados diretamente aos quatro pares de terminais do painel frontal do HP 4285A. Foram utilizados quatro cabos de 1 m para realizar a conexão do sensor ao HP 4285A e, portanto, foi preciso fazer a correção dos erros introduzidos no circuito pela inserção dos cabos; (l) o painel frontal mostra, sequencialmente, o primeiro e o segundo valor medido de C_p (em Farad) e G (em Siemen). As unidades dessas grandezas físicas são transformadas pelo programa (Figura 8) para pF e μS , respectivamente, para facilitar a resolução das Equações (1) e (2); (m) antes de se iniciar a medição dos valores de C_p e G associados a uma amostra com determinado teor de água e os correspondentes cinco valores de massa específica aparente, mede-se os valores C_p e G do capacitor vazio. Isso é necessário para calcular os valores das variáveis das Equações (1) e (2). Do valor medido de capacitância (C_m) deve-se subtrair a capacitância relacionada à deformação das linhas de campo nas bordas do capacitor (C_f). O valor de C_f , para o capacitor de cilindros concêntricos utilizado no presente trabalho, deve ser calculado pela seguinte equação $C_f = C_e - 7,9768$, em que C_e corresponde à capacitância do capacitor vazio e o valor numérico é uma constante física do capacitor e está relacionada à capacitância dos elementos de teflon que o constituem. O valor de C_e é calculado pelo subprograma mostrado na Figura 8; (n) tendo sido medidos os valores das variáveis presentes nas Equações (1) e (2),

calculam-se os valores de ε' e ε'' , para cada tratamento, ou seja, teor de água vs massa específica aparente vs frequência de oscilação; (o) há um indicador visual no painel frontal (Medições), ocupando toda a parte lateral direita, que vai sendo preenchido à medida que os valores de ε' e ε'' vão sendo calculados para cada uma das 19 frequências estabelecidas pelo programa; e finalmente, (p) estuda-se a variação dos parâmetros dielétricos em função do teor de água, da massa específica, da frequência e dos quatro híbridos (que foi o objetivo do segundo trabalho apresentado na tese). Isso permite escolher as frequências mais adequadas para a derivação de modelos dielétricos para o cálculo do teor de água e que sejam independentes da massa específica aparente.

3.1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se, na Figura 13, um exemplo do resultado dos valores gravados pelo programa em um arquivo texto. As colunas referem-se às seguintes dados: o híbrido de sorgo empregado nas medições; teor de água (% b.u.), nível de massa específica aparente, número da repetição, data, hora, frequência (Hz); C_p (F); G (S); C_p (pF); G (μ S); ε' ; e ε'' .

```
Arquivo : c:\Leitura_17112011\SORGO-BRS30807D5R3.txt;
Variedade;Percental bu;Densidade;Repeticao;Data;Hora;Frequencia;Valor 1;Valor 2;Capacitancia;Condutancia;e';e";
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:48:28;75000;2,172530E-11;2,371730E-7;21,7253000000;0,2371730000;3,2666401824;38,7572313188;0,0584830264;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:48:35;80000;2,170650E-11;2,540770E-7;21,7065000000;0,2540770000;3,2625898162;38,5424400882;0,0587038551;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:48:42;85000;2,168920E-11;2,706090E-7;21,6892000000;0,2706090000;3,2595412464;38,3993045959;0,0588432856;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:48:49;90000;2,167230E-11;2,878140E-7;21,6723000000;0,2878140000;3,2564995855;38,1793083673;0,0591026837;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:48:56;95000;2,165580E-11;3,041440E-7;21,6558000000;0,3041440000;3,2537031919;38,0879538449;0,0591710230;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:49:03;100000;2,164120E-11;3,211760E-7;21,6412000000;0,3211760000;3,2513731519;37,9223274191;0,0593680110;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:49:09;200000;2,143210E-11;6,904690E-7;21,4321000000;0,6904690000;3,2147540417;34,7175168292;0,0637935614;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:49:16;300000;2,130010E-11;1,107200E-6;21,3001000000;1,1072000000;3,1913603703;32,1454671663;0,0681701205;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:49:23;400000;2,119860E-11;1,544320E-6;21,1986000000;1,5443200000;3,1734869421;30,4852862505;0,0712962616;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:49:30;500000;2,111890E-11;2,025060E-6;21,1189000000;2,0250600000;3,1597692414;28,8759244978;0,0747948084;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:49:37;600000;2,104890E-11;2,513250E-6;21,0489000000;2,5132500000;3,1474540555;27,7652368436;0,0773432644;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:49:44;700000;2,098390E-11;3,022640E-6;20,9839000000;3,0226400000;3,1363600249;26,7922509129;0,0797379821;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:49:51;800000;2,092830E-11;3,539970E-6;20,9283000000;3,5399700000;3,1265666022;26,0284294434;0,0817016873;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:49:58;900000;2,087590E-11;4,062100E-6;20,8759000000;4,0621000000;3,1174744369;25,4097701071;0,0833330813;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:50:05;1000000;2,082820E-11;4,596340E-6;20,8282000000;4,5963400000;3,1091733453;24,8547228909;0,0848600628;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:50:12;2000000;2,056160E-11;1,115300E-5;20,5616000000;1,1530000000;3,0576965593;20,0589860580;0,1025822817;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:50:18;3000000;2,038200E-11;1,856690E-5;20,3820000000;1,8566900000;3,0230810419;17,8126209655;0,1135757082;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:50:25;4000000;2,028240E-11;2,626940E-5;20,2824000000;2,6269400000;3,0002297223;16,6593026072;0,1200668341;
SORGO-BRS308;07;D5;R3;17/11/2011;10:50:31;5000000;2,026470E-11;3,465670E-5;20,2647000000;3,4656700000;2,9866536548;15,7870021834;0,1258410958;
```

Figura 13. Exemplo dos valores gravados em um arquivo texto.

Um exemplo da inclusão dos dados no SGBD PostgreSQL, versão 9.1, pode ser observado na Figura 14, onde se mostram, parcialmente, algumas das informações incluídas. Não aparecem nessa figura, por restrição de espaço e legibilidade, os valores referentes aos seguintes parâmetros: C_f (capacitância relacionada à deformação das linhas de campo nas bordas do capacitor), C_p (pF), G (μ S), constantes das Equações (1) e (2), C_0 (capacitância do capacitor vazio), ϵ' , ϵ'' , massa da amostra, temperatura e umidade relativa do ambiente. Outra forma de visualizar os dados gerados pelo programa é por meio de uma planilha do Excel, como mostra a Figura 15.

	leitura [PK]	serial	variedade character varying(10)	percentual_b character(2)	densidade character(2)	repeticao character vai	data character(10)	hora character(8)	frequencia integer	valor1 double precis	valor2 double precis
13939	18379		SORGO-BRS310	07	D5	R1	17/11/2011	15:35:29	700000	2.08094e-01	3.04128e-00
13940	18380		SORGO-BRS310	07	D5	R1	17/11/2011	15:35:36	800000	2.07529e-01	3.56246e-00
13941	18381		SORGO-BRS310	07	D5	R1	17/11/2011	15:35:43	900000	2.0702e-011	4.08601e-00
13942	18382		SORGO-BRS310	07	D5	R1	17/11/2011	15:35:50	1000000	2.0652e-011	4.61786e-00
13943	18383		SORGO-BRS310	07	D5	R1	17/11/2011	15:35:57	2000000	2.03873e-01	1.11497e-00
13944	18384		SORGO-BRS310	07	D5	R1	17/11/2011	15:36:03	3000000	2.02062e-01	1.84635e-00
13945	18385		SORGO-BRS310	07	D5	R1	17/11/2011	15:36:10	4000000	2.01077e-01	2.62554e-00
13946	18386		SORGO-BRS310	07	D5	R1	17/11/2011	15:36:16	5000000	2.00851e-01	3.47033e-00
13947	18387		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:39:14	75000	2.17503e-01	2.45027e-00
13948	18388		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:39:21	80000	2.1726e-011	2.62626e-00
13949	18389		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:39:29	85000	2.171e-011	2.7863e-007
13950	18390		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:39:35	90000	2.16959e-01	2.96258e-00
13951	18391		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:39:43	95000	2.16785e-01	3.12989e-00
13952	18392		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:39:49	100000	2.16631e-01	3.30488e-00
13953	18393		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:39:56	200000	2.14464e-01	7.1028e-007
13954	18394		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:40:02	300000	2.1311e-011	1.13504e-00
13955	18395		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:40:09	400000	2.12066e-01	1.59655e-00
13956	18396		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:40:17	500000	2.11223e-01	2.06452e-00
13957	18397		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:40:23	600000	2.10518e-01	2.56925e-00
13958	18398		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:40:30	700000	2.0984e-011	3.08837e-00
13959	18399		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:40:37	800000	2.09281e-01	3.61062e-00
13960	18400		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:40:44	900000	2.08743e-01	4.14469e-00
13961	18401		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:40:51	1000000	2.08265e-01	4.68555e-00
13962	18402		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:40:58	2000000	2.05555e-01	1.13562e-00
13963	18403		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:41:04	3000000	2.03727e-01	1.87825e-00
13964	18404		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:41:11	4000000	2.02711e-01	2.65932e-00
13965	18405		SORGO-BRS310	07	D5	R2	17/11/2011	15:41:17	5000000	2.0248e-011	3.51839e-00
13966	18406		SORGO-BRS310	07	D5	R3	17/11/2011	15:43:56	75000	2.15933e-01	2.42017e-00
13967	18407		SORGO-BRS310	07	D5	R3	17/11/2011	15:44:04	80000	2.15765e-01	2.58991e-00

Figura 14. Exemplo de dados salvos no PostgreSQL.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Arquivo : c:\Leitura_20102011\SORGO-BRS30823D5R3.xlsx								
2									
3	Variedade	% b.u.	Densidade	Repetição	Data	Hora	Frequencia	Primeiro Valor	Segundo Valor
4	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:37:54	75.000	5,71E-11	3,05E-06
5	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:38:01	80.000	5,69E-11	3,35E-06
6	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:38:08	85.000	5,67E-11	3,64E-06
7	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:38:15	90.000	5,65E-11	3,95E-06
8	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:38:22	95.000	5,63E-11	4,26E-06
9	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:38:29	100.000	5,61E-11	4,58E-06
10	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:38:35	200.000	5,22E-11	1,14E-05
11	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:38:42	300.000	4,93E-11	1,84E-05
12	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:38:49	400.000	4,71E-11	2,50E-05
13	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:38:56	500.000	4,54E-11	3,10E-05
14	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:39:03	600.000	4,40E-11	3,65E-05
15	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:39:10	700.000	4,29E-11	4,17E-05
16	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:39:17	800.000	4,19E-11	4,64E-05
17	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:39:24	900.000	4,13E-11	5,13E-05
18	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:39:30	1.000.000	4,06E-11	5,56E-05
19	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:39:37	2.000.000	3,70E-11	9,07E-05
20	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:39:44	3.000.000	3,54E-11	1,20E-04
21	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:39:50	4.000.000	3,46E-11	1,46E-04
22	SORGO-BRS308	23	D5	R3	20/10/2011	16:39:57	5.000.000	3,40E-11	1,71E-04
23									

Figura 15. Exemplo de uma planilha Excel criada pelo programa.

Portanto, os dados gerados pelo programa foram disponibilizados em forma de arquivo texto, banco de dados e planilha Excel. Com essa flexibilidade no registro de dados, foi possível analisar a variação de ϵ' e ϵ'' em função da frequência para massa específica aparente média de $749 \pm 3 \text{ kg m}^{-3}$, $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e $62 \pm 7\%$ de umidade relativa (Figura 16). A análise abrangente dessa variação encontra-se no segundo trabalho da tese.

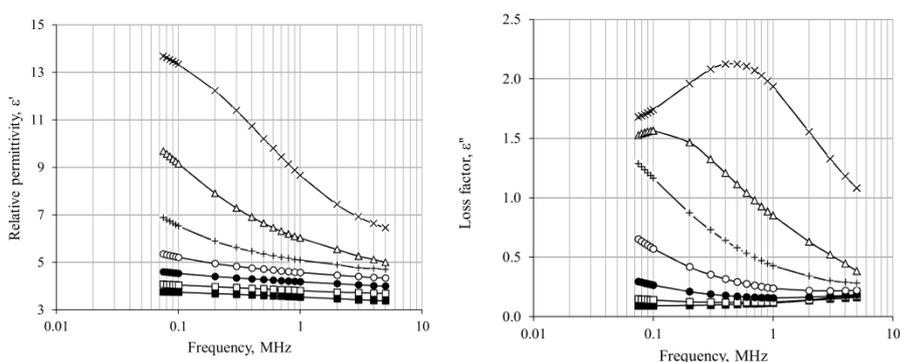


Figura 16. Variação de ϵ' e ϵ'' de grãos de sorgo do híbrido CMSXS 769 em função da frequência, para valores indicados de teor de água e massa específica aparente, a $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e $62 \pm 7\%$ de umidade relativa. ■, 7,3% (752 kg m^{-3}); □, 9,4% (746 kg m^{-3}); ●, 11,3% (749 kg m^{-3}); ○, 12,8% (754 kg m^{-3}); +, 14,8% (750 kg m^{-3}); △, 17,1% (746 kg m^{-3}); ×, 20,1% (746 kg m^{-3}).

Para a validação parcial do programa foi necessário desenvolver modelos dielétricos que correlacionassem o teor de água aos valores medidos de ε' e ε'' , tarefa descrita em detalhes no terceiro trabalho da tese. Neste trabalho foram obtidos os modelos dielétricos descritos pelas Equações (3) a (6) para estimativa do teor de água (M, % b.u.) de grãos de sorgo, independentemente da massa específica aparente das amostras. Após serem avaliadas quanto a diversos parâmetros de erro, a Equação (6) foi a que apresentou melhor desempenho, permitindo estimar o teor de água com erro padrão de calibração de 1,2 pontos percentuais de umidade. O gráfico de correspondência entre os valores estimados de teor de água pelo programa descrito no presente trabalho e o teor de água determinado em estufa encontra-se na Figura 17. A validação final do programa será realizada quando for possível usá-lo para a medição do teor de água de amostras de sementes de sorgo que não foram utilizadas na derivação do modelo matemático escolhido.

$$M = 1.043594 \varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.034881 \varepsilon'_{0.075\text{MHz}} + 2.393574 \quad (3)$$

$$M = -0.65190\varepsilon'_{0.5\text{MHz}} + 0.15188 \ln(\varepsilon'')_{0.5\text{MHz}} - 0.22644\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 7.08489 \ln(\varepsilon'')_{5\text{MHz}} + 29.25013 \quad (4)$$

$$M = -0.55869\varepsilon'_{1\text{MHz}} + 0.63512 \ln(\varepsilon'')_{1\text{MHz}} - 0.24277\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 5.83619 \ln(\varepsilon'')_{5\text{MHz}} + 27.53590 \quad (5)$$

$$M = \left[\frac{0,009437 \varepsilon'_{5\text{MHz}} + 0,006434 \ln(\varepsilon'')_{5\text{MHz}} + 0,026041}{0,066531 \varepsilon'_{5\text{MHz}} - 0,088777 \ln(\varepsilon'')_{5\text{MHz}} - 0,023760} \right] 100 \quad (6)$$

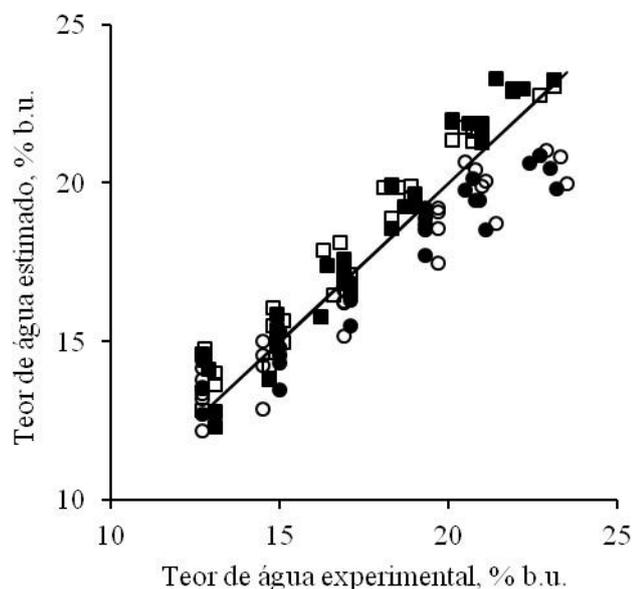


Figura 17. Gráfico de correspondência entre os valores de teor de água determinados pelo método padrão de estufa e os estimados pelo programa desenvolvido em LabVIEW empregando-se a Equação (6), a $22,5 \pm 0,8$ °C e $63 \pm 6\%$ de umidade relativa, para os híbridos indicados. ●, BRS 308; ○, BRS 310; ■, BRS 655; □, CMSXS 769.

3.1.4. CONCLUSÕES

O programa desenvolvido em LabVIEW mostrou-se eficaz no controle, na configuração e na leitura dos valores medidos de capacitância (C_p) e condutância (G) pelo medidor de parâmetros de impedância HP 4285A. Além disso, o programa efetuou o cálculo imediato dos parâmetros dielétricos de interesse, ou seja, a permissividade elétrica relativa ϵ' e o fator de perda dielétrica ϵ'' . A partir desses dados, o programa proposto efetuou, por meio de um modelo dielétrico específico, o cálculo do teor de água de amostras de sementes de quatro híbridos de sorgo, independentemente da massa específica aparente ρ , com erro padrão de calibração de 1,2 pontos percentuais de umidade. Esse resultado permite antever a utilização do programa em mecanismos de controle automático de secadores, quando um protótipo de medidor on-line do teor de água de produtos

agrícolas granulares, baseado nas premissas aqui estabelecidas, estiver disponível.

3.1.5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), da *International Foundation for Science* (IFS) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Estendemos nossos agradecimentos ao Sr. José Rodrigues Avelino Santos, pesquisador do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) pelo fornecimento dos lotes de sementes dos quatro híbridos de sorgo utilizados neste experimento.

3.1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Berbert, P.A. (1995) On-Line density-independent moisture content measurement of hard winter wheat using the capacitance method. PhD Thesis in Agricultural Engineering – Silsoe – Bedfordshire, Cranfield University, 227p.

Berbert, P.A., Stenning, B.C. (1996) On-line moisture content measurement of wheat. *J. Agric. Eng. Res.*, 65 (4):287-296.

Berbert, P.A., Stenning, B.C. (1997) Propriedades dielétricas do trigo (*Triticum aestivum* L.) no intervalo de 1 kHz a 1 MHz. *Rev. Bras. Armazenamento*, 22 (1):13-22.

Berbert, P.A., Stenning, B.C. (1998a) Determinação do teor de umidade de sementes de trigo por meio da medição simultânea de dois parâmetros

dielétricos em uma única frequência. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2(3):329-334.

Berbert, P.A., Stenning, B.C. (1998b) Construção e avaliação de um capacitor de cilindros concêntricos para determinação das propriedades dielétricas de grãos. *Eng. Agric.*, 18(1):76-91.

Berbert, P.A., Stenning, B.C. (1999) Redução da influência da massa específica na determinação do teor de umidade de sementes de trigo. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, 34(4):641-650.

Berbert, P.A., Stenning, B.C., Silva, J.S., Queiroz, D.M., Melo, E.C. (1999) Derivação de uma equação para o cálculo do teor de umidade de sementes de trigo utilizando-se o fator de qualidade Q. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 3(2):202-210.

Berbert, P.A., Molina, M.B., Viana, A.P., Carlesso, V.O., Oliveira, M.T.R. (2007) Meyer and Schilz function to estimate common bean seed water content evaluated by radiofrequency. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 64(6):569-574.

Berbert, P.A., Molina, M.B., Carlesso, V.O., Oliveira, M.T.R. (2008) Utilização de função dielétrica para estimar o teor de água de sementes de café. *Bragantia*, 67(2):541-548.

Chuang, C.L., Ouyang, C.S., Lin, T.T., Yang, M.M., Yang, E.C., Huang, T.W., Kuei, C.F., Luke, A., Jiang, J.A. (2011) Automatic X-ray quarantine scanner and pest infestation detector for agricultural products. *Computers and Electronics in Agriculture*, 77:41-59.

Funk, D.B., Gillay, Z., Meszaros P. (2007) Unified moisture algorithm for improved RF dielectric grain moisture measurement, *Meas. Sci. Technol.*, 18(4):1004-1015.

- ISTA. International Seed Testing Association (2010) Determination of moisture content. In: ISTA *International Rules for Seed Testing*. Bassersdorf, 9-1–9-20.
- Jafari, M., Hemmat, A., Sadeghi, M. (2010) Development and performance assessment of a DC electric variable-rate controller for use on grain drills. *Computers and Electronics in Agriculture*, 73:56-65.
- Johnson, G.W. (1997). LabVIEW Graphical Programming: Practical Applications in Instrumentation and Control. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 665p.
- King, R.J. (1995) On-Line moisture and density measurement of foods using microwave sensors. *Conference on Food Processing Automation*, 4, Chicago. St. Joseph: ASAE. 127-138.
- Kraszewski, A.W., Nelson, S.O. (1991) Density-independent moisture determination in wheat by microwave measurement. *Trans. ASAE*, 34 (4):1776-1783.
- Li, Z., Vijaya-Raghavan, G.S., Wang, N., Garipey, Y. (2009) Realtime, volatile-detection-assisted control for microwave drying. *Computers and Electronics in Agriculture* 69: 177–184.
- Martynenko, A.I. (2006) Computer-Vision system for control of drying processes. *Drying Technol.*, 24:879-888.
- Meyer, W., Schilz, W. (1980) A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 13 (10):1823–1830.
- Morissette, R., Savoie, P. (2008) Simulation of baled hay drying with airflow inversion and exhaust air recirculation. *Can. Agric. Eng.*, 50:3.9-3.19.

- Nelson, S.O. (1992) Measurement and applications of dielectric properties of agricultural products. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 41 (1):116-122.
- Ni, J.Q, Heber, A.J. (2010) An onsite computer system for comprehensive agricultural air quality research. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71:38-49.
- Rindler, V., Schwindke, P., Heschel, I., Rau, G. (1998) Technical description of a new low-temperature freeze-drying device. *Int. J. Refrig.*, 21(7):535-541.
- Samer, M., Loebstin, C., von Bobruzki, K., Fiedler, M., Ammona, C., Berg, W., Sanftleben, P., Brunsch, R. (2011) A computer program for monitoring and controlling ultrasonic anemometers for aerodynamic measurements in animal buildings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79:1-12.
- Trabelsi, S., Kraszewski, A.W., Nelson, S.O. (1999) Determining physical properties of grain by microwave permittivity measurements. *Trans. ASAE* 42 (2):531-536.
- Trabelsi, S., Nelson, S.O., Lewis, M.A. (2009) Microwave nondestructive sensing of moisture content in shelled peanuts independent of bulk density and with temperature compensation. *Sens. & Instrumen. Food Qual.*, 3 (2):114-121.
- Wells, L.K., Travis, J. (1997) *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Even Easier*. Bergen County: Prentice Hall. 586p.
- Whitley, K.N., Novick, L.R., Fisher, D. (2006) Evidence in favor of visual representation for the dataflow paradigm: An experiment testing LabVIEW's comprehensibility. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64 (4):281-303.

3.2. Trabalho 2: Frequency, Moisture Content, Bulk Density and Hybrid Effects on Grain Sorghum Dielectric Properties

The interest in the dielectric properties of grains has been increasing over the years due to their potential utilization in advanced technologies such as the density-independent on-line estimation of moisture content in automatic control processes in grain-drying operations. This paper discusses the variation of relative permittivity and the dielectric loss factor of four hybrids of grain sorghum in the frequency range from 75 kHz to 5 MHz, at 23 °C and 62% relative humidity. Curves are presented that illustrate the variation of these dielectric properties on moisture content (7 to 23% w.b.), bulk density (575 to 819 kg m⁻³) and hybrid.

Keywords Relative permittivity; Loss factor; RF impedance; Moisture content; Bulk density

3.2.1. INTRODUCTION

The majority of high-capacity grain-drying installations around the world are of the continuous-flow, high-temperature type, where the aim is, as far as possible, to produce a finished dry product after only one pass of the stock through the drier. The retention time of the grain in a continuous-flow drier depends on the initial moisture content of the grain, the drying-air temperature and airflow rate, and the dimensions of the drier. ^[1] Moreover, the moisture content of grain at harvest varies randomly and the grain drying rate also varies considerably as it passes through the drier, an indication that some under- or overexposure of the grain in the drying compartment may lead to significant under- or overdrying. ^[2, 3] Overdrying increases production costs by increasing fuel consumption and underdrying may lead to serious storage problems.

For many years the control of continuous-flow driers was entirely manual, whereby the condition of the grain leaving the drier was adjusted by the operator until the required moisture content value was achieved. This was usually done by control of the discharge rate of the drier, the other variables of airflow rate and air

temperature having been predetermined, the first by the drier manufacturer and the second usually by the operator, having regard for the eventual prospective use of the grain. The measurement of the moisture content was usually by means of one of the wide range of moisture meters available on the market. The control of discharge rate was, then, a matter for immediate decision by the operator and he was predominantly influenced by the moisture content of the emerging grain. ^[2]

Wherever human intervention of this nature is required, particularly when the operator has numerous responsibilities of which supervision of the drier is only one, there is scope for error. It can be seen, therefore, that the manipulation of grain drier performance is a matter which can benefit greatly from the introduction of automatic control technology.

In order to reduce energy consumption and to relieve the drier operator of some of the demanding responsibilities of making decisions in difficult circumstances, manufacturers have indeed introduced, at various times in the past forty years, automatic monitoring and control systems based on electrical or thermal methods of estimation of moisture content. In any automatic control system it is the measurement of the controlled variable which is the primary key to success, and regrettably the equipment currently available has not always led to the desired accuracy of control. The reasons for this have been discussed by other authors, ^[3,4] but the essential problems hinge on one or more of the following: (a) Although partial differential equation grain drying models based on the laws of heat and mass transfer can be found in literature, not all of the assumptions made in the derivation of such models are properly clarified, leading to fitting of some lumped parameter models, which does not provide as accurate a prediction of the drying phenomena as is required when a model-based control algorithm for on-line control is used; ^[4,5] (b) Where electrical resistance or capacitance-based methods are employed, the restriction of being able to take only localised, and therefore usually not representative, readings of moisture content of the grain entering or leaving the drier, is the difficulty; (c) Variation in the moisture content of the incoming crop is not normally sensed by the control system. Indeed, the moisture content of the drying crop is not evaluated until a considerable amount of drying has already been done, or is only detected when the grain finally exits the drier,

whatever type of moisture sensor is used. Early action to anticipate changes in the required amount of drying is therefore precluded; and (d) Variation of the grain bulk density (kg m^{-3}) of the measured samples under static conditions or fluctuations of the grain mass flow rate ($\text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) under continuous flow conditions can produce significant errors in moisture estimation. ^[6-8]

Most of the above-mentioned constraints for the development of *smart* driers in which a controller automatically tunes the drying conditions such that the mean output moisture content reaches a value close to the set-point, can be overcome by the indirect estimation of grain moisture content through its dielectric properties. ^[9-12] Indeed, studies of the dielectric properties of cereal grains such as corn, ^[13, 14] rice, ^[15, 16] wheat ^[17, 18] and barley, ^[19] have been conducted over the last forty years, using either radiofrequency or microwave aquametry, a fundamental step towards the development of on-line density-independent models for moisture content estimation.

In order to design a comprehensive capacitive sensor for the estimation of on-line grain moisture content in automatic control operations, dielectric data for a number of cereal grains, pulses, oilseeds and coffee are required. Of the major cereal crops produced worldwide, only grain sorghum has not yet been fully characterised through its dielectric properties. Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is an indigenous African grass, with Ethiopia regarded as one of the main sources of origin and the major centre of diversity for the species. ^[20] The crop presents high water use efficiency for growing in high temperature and drought-prone areas and, due to its high tolerance of semi-arid environments and nutrient-poor soils, it is capable of enduring subpar growing conditions. ^[21, 22] Sorghum is the fifth most important cereal crop in the world, in terms of both production (55.7 million tonnes) and harvested area (40.5 million ha). ^[23] Although its production is less than that of the other major cereal crops, it is nonetheless a staple for both humans (grain sorghum for starch) and livestock (sorghum for forage and silage), and is also grown for syrup and bio-ethanol production (sweet sorghum). ^[24, 25] Therefore, the object of the research work described in this paper is to measure the dielectric properties of static samples of four sorghum hybrids as a preliminary step towards the development of a density-independent method capable of

evaluating its moisture content continuously, and on-line, at excitation frequencies in the range 75 kHz to 5 MHz, for moisture contents between 7 and 23% w.b.

3.2.2. MATERIAL AND METHODS

3.2.2.1. Sample container and measuring principle

The description of the sample container used to determine the dielectric properties of grain sorghum in this study can be found elsewhere. ^[26] The two parameters of the complex relative permittivity of the sample material, $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, were calculated from measurements of the equivalent parallel capacitance and the conductance of the sample container, both empty and filled with a grain sample. A detailed description of the measuring principle used in this work can be found in a previous paper. ^[27]

3.2.2.2. Equipment and procedures

A Hewlett-Packard model 4285A Precision LCR Meter was used for measuring the dielectric properties of grain sorghum samples in the frequency range from 75 kHz to 5 MHz. The instrument can measure complex impedance, $|Z|e^{j\theta}$, and derived electric parameters of LCR components over the frequency range from 75 kHz to 30 MHz using test signal levels from 5 mV_{rms} to 2 V_{rms} with a basic accuracy of $\pm 0.1\%$. Measurements were taken with the voltage level set at 1.0 V_{rms} at intervals of 5 kHz from 75 kHz to 100 kHz; 100 kHz from 100 kHz to 1 MHz; 1 MHz from 1 MHz to 5 MHz. An Agilent 82357B USB/GPIB interface converter was used to provide a direct interface connection from the GPIB measuring instrument to a USB computer port. Automated data collection was performed using LabVIEW[®] software.

3.2.2.3. Grain sorghum samples

Certified seeds of two commercial grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) hybrids, BRS 308 and BRS 310, and of two forage sorghum hybrids, CMSXS 769 (experimental) and BRS 655 (commercial), were used for measurement of dielectric properties. Seed lots were obtained from the Maize & Sorghum Research Centre of the Brazilian Agricultural Research Corporation, EMBRAPA, after harvest in 2011. In order to maintain its original characteristics, the sorghum, initially at 13% w.b. moisture content, was stored in polyethylene bags in a controlled-environment chamber at 4 °C prior to any conditioning. The moisture content of 0.6 kg sub-samples of each hybrid was artificially raised from 13 to 23% in increments of approximately two percentage points of moisture by adding the required amount of distilled water. For reduction of moisture content from 13 to 7%, sub-samples were dried for different periods of time at 38 °C in a prototype laboratory drier. After conditioning, the sub-samples were sealed in air-tight Kilner jars and stored at 4 °C, with periodic agitation for uniform moisture content distribution, for at least 15 days before they were drawn for measurements. All measurements were taken at room temperature, 22 ± 1 °C, and $62\pm 6\%$ relative humidity (r.h.), respectively. Determination of moisture content was made on a wet basis and was carried out according to the International Rules for Seed Testing. ^[28]

In order to assess the influence of bulk density when predicting sorghum moisture content from its dielectric parameters, the following procedure was employed, whereby five different levels of bulk density could be obtained for seed samples at the same moisture content level. Loose fill density was obtained by positioning the upper cylindrical container of a chondrometer above the sample holder. After this cylindrical container was filled with the sample, a slide was withdrawn, allowing the sample holder to be filled as loosely as possible with no significant settling of the seeds. The upper cylinder was then removed and the surplus seeds were struck off from the top of the cell. Increased levels of bulk density were obtained by pouring a fixed amount of seeds into brass funnels, which were mounted above the sample container. By varying the internal diameter

of the lower part of the funnel and the gap between the funnel lower edge and the top of the sample container, varying levels of settling of the seeds inside the sample holder could be achieved, resulting in three additional levels of bulk density. The inner electrode was capped on top by a polytetrafluoroethylene cone to produce a uniform filling of the sample container and to moderate the kinetic energy of the falling seeds. A plastic guard ring, machined to fit on top of the outer electrode, was used to prevent spilling of the seeds. Rapid filling of the sample container was achieved by pouring a fixed amount of seeds into the funnels and opening a fast-release aperture mounted in the lower part of the funnel. The guard ring and the cone were then removed and the surface formed by the seeds was made level with the top of both electrodes by striking off the excess material.

In order to achieve a controlled reduction in the bulk density of the measured samples, the seeds were thoroughly mixed with predetermined amounts of expanded polystyrene beads, approximately the same shape and size as sorghum seed, which has a permittivity very close to that of air: 1.017 from 1 kHz to 1 GHz. ^[29] Polystyrene foam is also an extremely low loss material over the same frequency range, with a value for the loss factor ϵ'' of 0.0001, and as a result of this the material is unlikely to introduce spurious effects on the accuracy of loss factor measurements of samples of grain sorghum. Confirmation that the permittivity of the beads closely equates to that of the intergranular air, which the beads simulated, was obtained from preliminary tests in which the concentric sample cell was filled with the beads and capacitance measurements made at frequencies over the range 75 kHz to 5 MHz. The procedure described above provided the lowest levels of the bulk density achieved in the present work.

Bulk density was calculated by dividing the sample weight by the known volume of the sample container. As a rule, three replications were performed at each combination of moisture content and bulk density levels, using the same sub-sample of sorghum seed each time. The dielectric properties calculated from the network output signals were averaged. Samples were allowed to reach room temperature before the electrical measurements were made. This was accomplished by removing the Kilner jars from refrigerated storage for at least 4 h

prior to the beginning of each measurement sequence. For high moisture sorghum samples, moisture content was determined before and after the electrical measurements in order to verify the need for moisture corrections because of possible natural drying of the samples during measurements. In practice, the change of moisture was always negligibly small (less than 0.3 percentage point moisture), and so no correction was needed.

3.2.3. RESULTS AND DISCUSSION

3.2.3.1. Bulk density

Variation of bulk density with moisture content of the four sorghum hybrids on moisture content was determined experimentally using a chondrometer, and the results are displayed in Fig. 1. Points shown are average values of five replications at 22 °C and 58% relative humidity. Best-fit curves obtained with a quadratic polynomial model, with coefficients of determination varying from 0.9252 (hybrid BRS 308) to 0.9946 (hybrid BRS 655), are also displayed. The experimental data confirmed the expected trend of decreasing bulk density with increasing moisture content for cereal grains. ^[1, 30, 31] It is also interesting to note that the changes in bulk density were greater at higher moistures than at lower moistures.

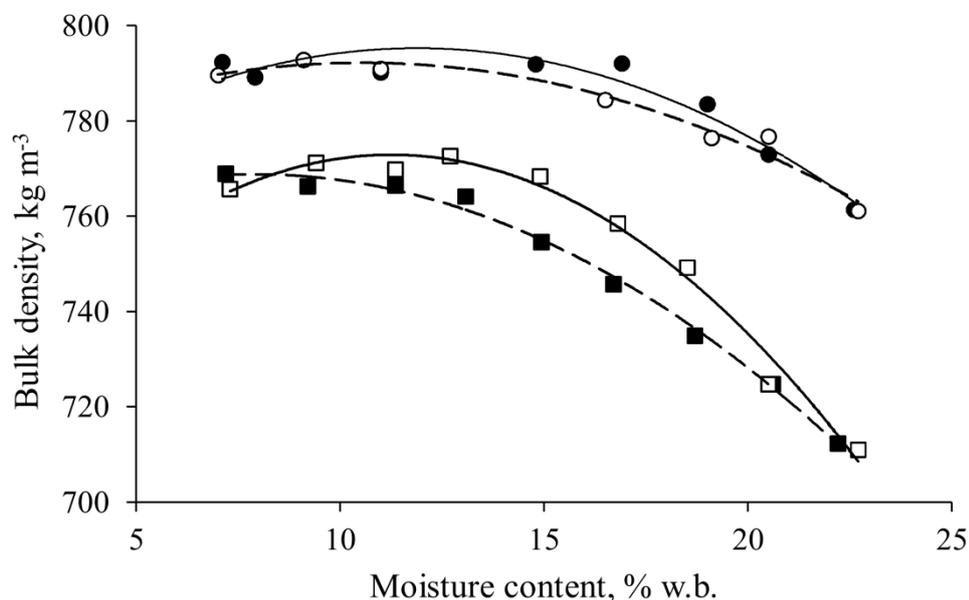


Fig. 1. Effect of moisture content on bulk density of grain sorghum at 22 °C and 58% r.h. ●, BRS 308; ○, BRS 310; ■, BRS 655; □, CMSXS 769.

The range of bulk densities obtained at each level of moisture content for the four hybrids is shown in Fig. 2. It can be seen that there was considerable scatter in the results at all moisture content levels studied. Grain sample mass varied from 0.316 to 0.450 kg, and bulk density values ranged from 575 to 819 kg m⁻³. For samples at 23% moisture, the bulk density varied as much as 13% above the loose fill density for hybrid BRS 655, whereas for the other hybrids it varied up to 11%. The respective value for lower bulk densities, in relation to the loose fill value, was 12%. Fluctuations up to 8.0% in bulk density inside a grain drier are not uncommon. [32] Use of grain spreaders during bin filling produced bulk densities 13% greater in sorghum, 7% greater in wheat, [33] and 9% in corn, [34] as compared to those produced by loading the bin from a central spout. However, the use of a grain stirrer during natural-air corn drying reduced the bulk density by 5%. [35] Therefore, the range of bulk densities achieved with the method described earlier is believed to represent the values that occur in practice.

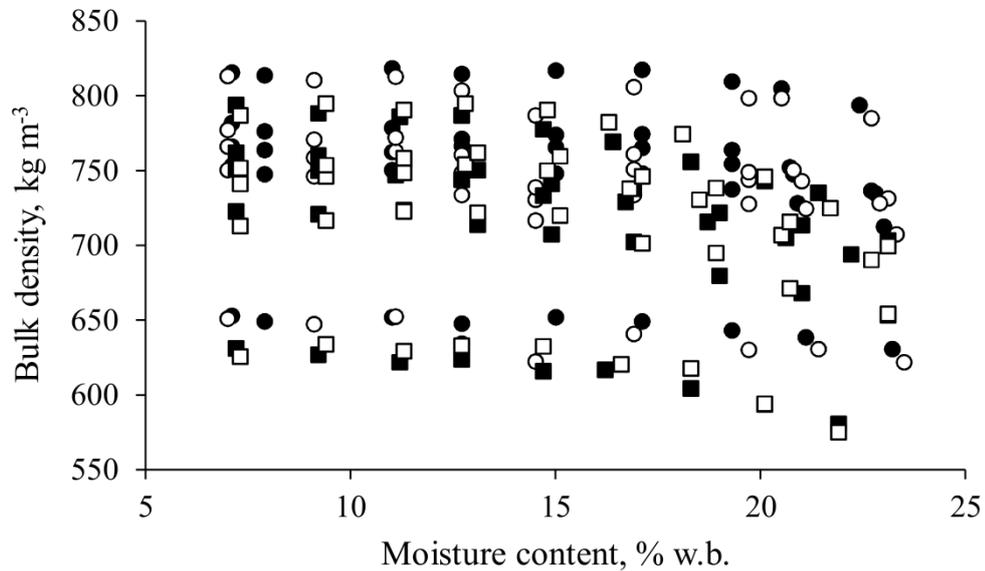


Fig. 2. Bulk density of four hybrids of grain sorghum versus moisture content for different sample container filling methods at 22 °C and 62% r.h. ●, BRS 308; ○, BRS 310; ■, BRS 655; □, CMSXS 769.

3.2.3.2. Dielectric parameters of four grain sorghum hybrids

Permittivity (ϵ') and loss factor (ϵ'') were calculated for the selected frequency range and plotted for experimental sorghum hybrid CMSXS 769 at several moisture contents and similar bulk densities. The results are shown in Figs. 3 and 4. The curves in these figures reaffirm that the magnitude of ϵ' and ϵ'' is heavily dependent on the frequency of the applied field and the grain moisture content.

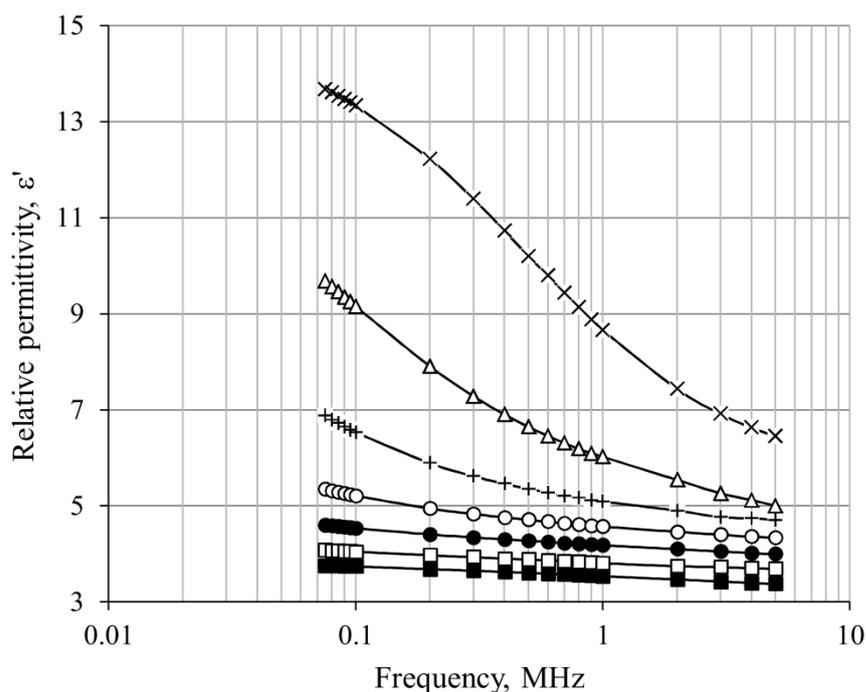


Fig. 3. Variation of relative permittivity of hybrid CMSXS 769 grain sorghum, with frequency at indicated moisture contents and bulk densities at $23\pm 1^\circ\text{C}$ and $62\pm 7\%$ r.h. ■, 7.3% (752 kg m^{-3}); □, 9.4% (746 kg m^{-3}); ●, 11.3% (749 kg m^{-3}); ○, 12.8% (754 kg m^{-3}); +, 14.8% (750 kg m^{-3}); △, 17.1% (746 kg m^{-3}); ×, 20.1% (746 kg m^{-3}).

As expected, the real component of the complex permittivity decreased as the frequency increased for grain of all moisture contents (Fig. 3). The dependence of the loss factor upon frequency was less regular than that of the permittivity (Fig. 4). For grain sorghum from 7.3% to 14.8% moisture, variation of ϵ'' with frequency was represented by upward facing parabolic curves in a semi log plot. In the range from 7.3 to 12.8% moisture, the downward portion of these curves, i.e., the region to the right of each vertex, increases as moisture increases. The highest ϵ'' value occurs at 75 kHz and decreases to its minimum value at 100 kHz for grain sorghum at 7.3% moisture. The corresponding values for grain at 9.4%, 11.3%, and 12.8% moisture are 500 kHz, 1 MHz, and 3 MHz. For grain sorghum at 14.8% moisture, ϵ'' always decreased with increasing frequency. Nonetheless, for high moisture grain sorghum the shape of the curves shown in

Fig. 4 changed to downward facing parabolas. The ascending portion of the curve at 17.1% moisture is seen to end somewhere between 100 and 200 KHz, whereas for 20.1% moisture grain the highest ϵ'' value is reached at 400 kHz. Curves of very similar shapes were obtained for seeds of sorghum hybrids BRS 308, BRS 310, and BRS 655. Some similar trends were observed in studies with wheat ^[17] and safflower seed. ^[36]

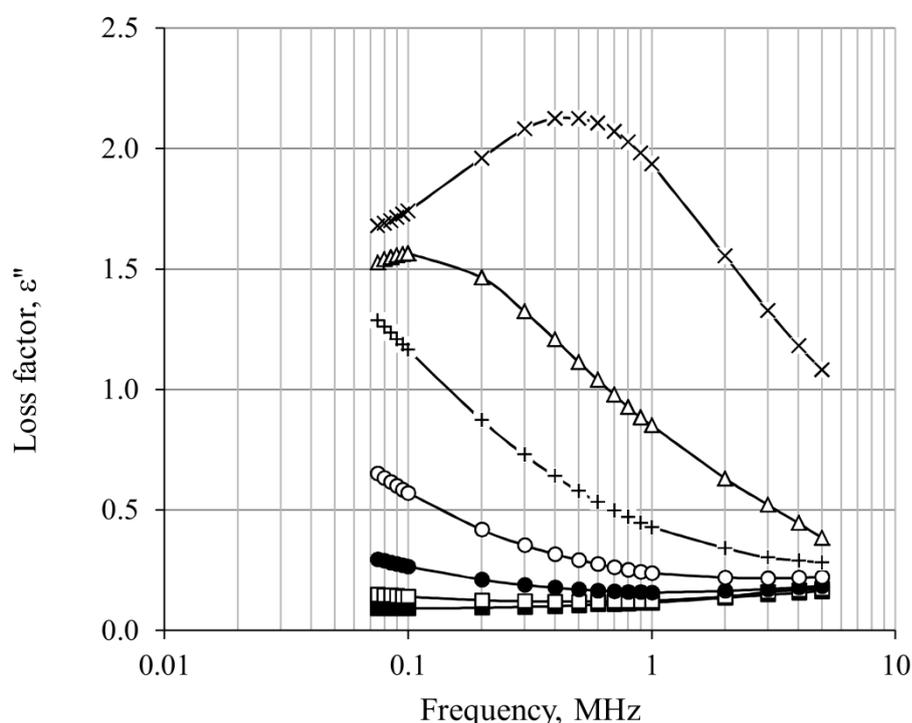


Fig. 4. Variation of loss factor of hybrid CMSXS 769 grain sorghum, with frequency at indicated moisture contents and bulk densities at $23\pm 1^\circ\text{C}$ and $62\pm 7\%$ r.h. ■, 7.3% (752 kg m^{-3}); □, 9.4% (746 kg m^{-3}); ●, 11.3% (749 kg m^{-3}); ○, 12.8% (754 kg m^{-3}); +, 14.8% (750 kg m^{-3}); △, 17.1% (746 kg m^{-3}); ×, 20.1% (746 kg m^{-3}).

Permittivity increased with the moisture content of grain sorghum at every frequency where measurements were taken. This is due to the relatively high permittivity of water in comparison to that of bone-dry grain. The differences in permittivity with moisture for grains of the experimental sorghum hybrid CMSXS 769 at a bulk density level around 788 kg m^{-3} are illustrated in Fig. 5, where the

regression lines and the experimental data points are shown for four values of frequency. It is apparent in Fig. 5 that the change of slope of the cubic model occurs at approximately 13-14% moisture for all studied frequencies, which indicates a possible region of dielectric dispersion. A similar behaviour has been reported by Berbert et al. (2001) ^[26] and Berbert et al. (2002) ^[27] for common bean and parchment coffee, respectively, although the regions of dispersion for those products occurred in the range of moisture from 16 to 18% w.b., depending on the frequency. The regression of moisture content, M , on permittivity, ϵ' , yielded the following polynomial equations, all with coefficients of determination r^2 very close to unity. At 5 MHz, a linear regression of moisture content on permittivity yielded a straight line: $\epsilon' = 0.2200M + 1.9335$, with a coefficient of determination of 0.9956.

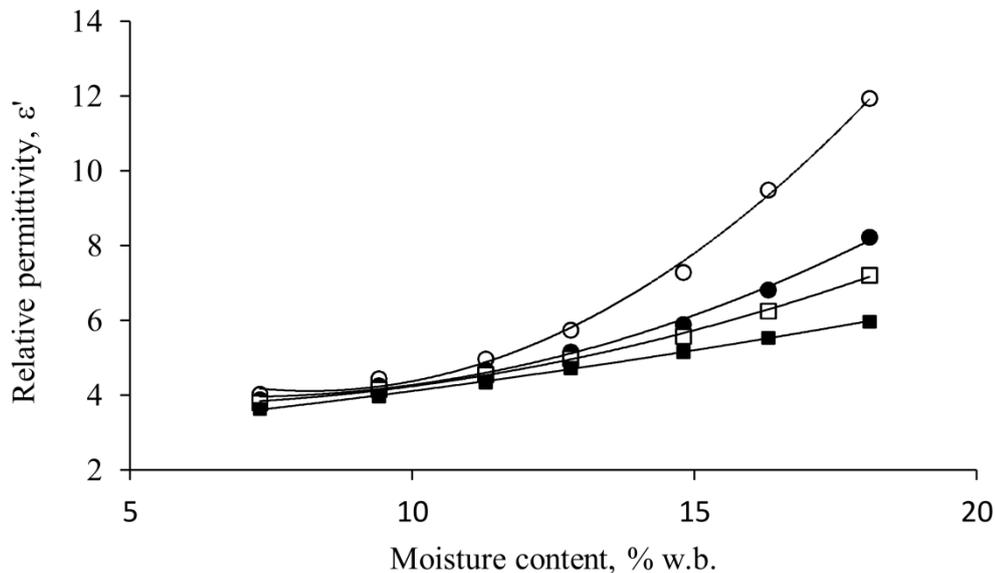


Fig. 5. Variation of permittivity with moisture content at indicated frequencies of hybrid CMSXS 769 grain sorghum at bulk densities of $788 \pm 7 \text{ kg m}^{-3}$, and $23 \pm 1^\circ\text{C}$ and $63 \pm 3\%$ r.h. ○, 100 kHz; ●, 500 kHz; □, 1 MHz; ■, 5 MHz.

$$\epsilon'_{(100 \text{ kHz})} = 0.0032M^3 - 0.0415M^2 + 0.1593M + 3.8832 \quad [r^2 = 0.9978] \quad (1)$$

$$\epsilon'_{(500 \text{ kHz})} = 0.0026M^3 - 0.0647M^2 + 0.7231M + 1.0438 \quad [r^2 = 0.9996] \quad (2)$$

$$\epsilon'_{(1 \text{ MHz})} = 0.0012M^3 - 0.0258M^2 + 0.3554M + 2.1182 \quad [r^2 = 0.9996] \quad (3)$$

$$\epsilon'_{(5 \text{ MHz})} = -0.0005M^3 + 0.0216M^2 - 0.0984M + 3.3687 \quad [r^2 = 0.9997] \quad (4)$$

Figure 6 shows the variation of the loss factor as a function of moisture content. The relationship was as regular as compared to the relationship between permittivity and moisture, and the regression of moisture content on loss factor also yielded cubic polynomial equations with high coefficients of determination, as follows:

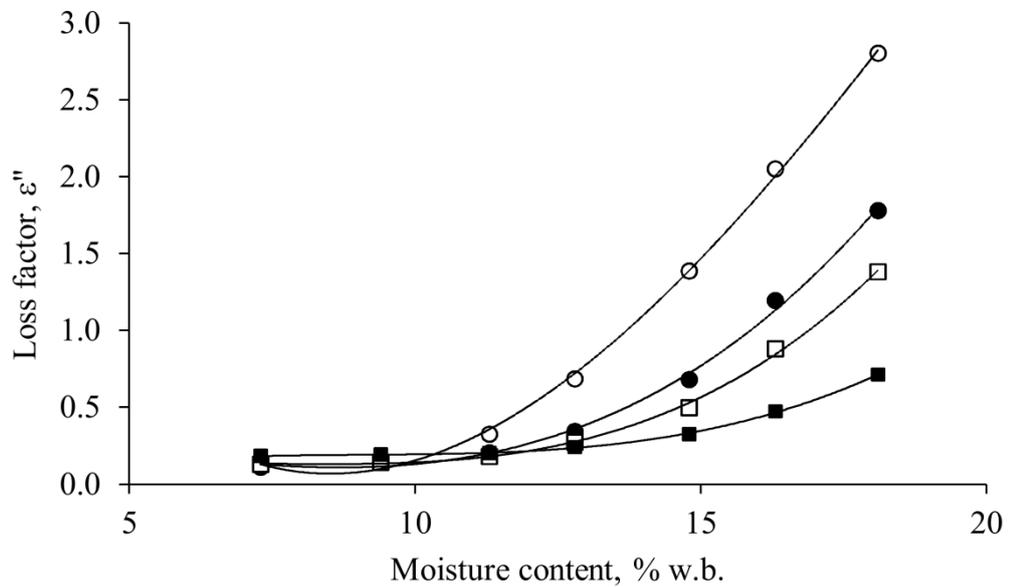


Fig. 6. Variation of loss factor with moisture content at indicated frequencies of hybrid CMSXS 769 grain sorghum at bulk densities of $788 \pm 7 \text{ kg m}^{-3}$, and $23 \pm 1^\circ\text{C}$ and $63 \pm 3\%$ r.h. ○, 100 kHz; ●, 500 kHz; □, 1 MHz; ■, 5 MHz.

$$\varepsilon''_{(100 \text{ kHz})} = -0.0011M^3 + 0.0671M^2 - 0.9137M + 3.6328 \quad [r^2 = 0.9984] \quad (5)$$

$$\varepsilon''_{(500 \text{ kHz})} = 0.0008M^3 - 0.0096M^2 - 0.0166M + 0.4453 \quad [r^2 = 0.9969] \quad (6)$$

$$\varepsilon''_{(1 \text{ MHz})} = 0.0011M^3 - 0.0247M^2 + 0.1831M - 0.3116 \quad [r^2 = 0.9980] \quad (7)$$

$$\varepsilon''_{(5 \text{ MHz})} = 0.0007M^3 - 0.0187M^2 + 0.1728M - 3.3496 \quad [r^2 = 0.9992] \quad (8)$$

Figure 6 shows the regression lines of the above-mentioned best-fit equations and the experimental data points for four values of frequency. It can be

observed that there are some inconsistencies in the loss factor values obtained for grain in the lower moisture content range (7.3% to 11.3%). For instance, for the same moisture content, there are some values of ε'' which are higher at higher rather than lower frequencies. As was the case of the variation of permittivity with moisture, it can also be noted that at certain values of frequency, 500 kHz to 5 MHz, there occurs a change in the slope of the curves representing the variation of ε'' on moisture at 15% w.b., confirming a region of possible dielectric dispersion. Noticeable changes in the slopes of the ε'' vs moisture curves for parchment coffee [27] and common bean [26] have occurred at somewhat higher values of moisture, i.e., from 16 to 18% w.b., and from 15 to 16% w.b., respectively. As has been noted elsewhere, [26, 27] the changes in permittivity and loss factor as a result of changes in moisture content were greater at lower frequencies than at higher frequencies.

As pointed out, the observed changes in slope of the curves representing the variation of ε' and ε'' on moisture content occurred at 13-14% and 15% w.b., respectively. These changes are generally considered an indication of changes in the binding forces that exist between a monolayer of water molecules bound to the surface of the cells that form the walls of the capillaries within the grain (strongly bound water) and between adsorbed water molecules and molecules of water vapour, i.e., less tightly bound water or free water molecules. [37] If the above assumption is correct, the change in slope of the equilibrium moisture content curve for grain sorghum should occur at the same moisture interval indicated by the dielectric dispersion. Indeed, by determining the 20 °C isotherm for the grain sorghum hybrid CMSXS 769 from 40 to 80% r.h., the change in slope occurred at 13% w.b. and the equilibrium relative humidity was 65%. For the lower portion of the isotherm, 40 to 65% r.h., the regression of moisture (M) on relative humidity (r.h.) yielded a straight line ($M = 0.1046 \text{ r.h.} + 6.16$) with a coefficient of determination of 0.9895. The corresponding results for the interval $65\% \leq \text{r.h.} \leq 80\%$ were $M = 0.2220 \text{ r.h.} - 1.52$, with a coefficient of determination of 0.9891. The dielectric parameters of grain sorghum from the other three hybrids were similarly influenced by variations in frequency and moisture content.

Results of the measurements of the permittivity and loss factor of grain sorghum at 1.0 MHz, as they vary with bulk density for hybrid BRS 310, are shown in Figs. 7 and 8, respectively. All measurements were taken in a room where the temperature was 22 ± 1 °C and the relative humidity was $58\pm 5\%$. Considering that, theoretically, a line representing the relationship between ϵ' and ρ converges to a point whose Cartesian co-ordinates are very close to (0,1), linear regressions were performed to relate relative permittivity to bulk density values for the whole moisture content range studied, and the results are shown in Fig. 9. So, when the sample container is empty and ρ has a value of 0 kg m^{-3} , the permittivity approaches a value very close to unity, 1.0006, which is the established value of the permittivity of air. ^[38] The linear equations relating permittivity and bulk density for moisture contents in the range from 7.0 to 23.1% and their coefficients of determination are shown in Table 1.

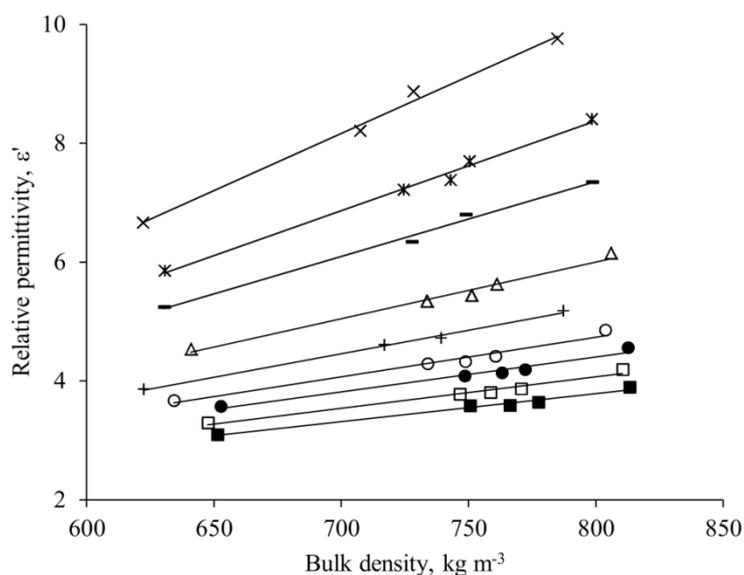


Fig. 7. Variation with grain bulk density of the relative permittivity of grain sorghum, hybrid BRS 310, at indicated moisture contents, 1 MHz, 22 ± 1 °C and $58\pm 5\%$ r.h. ■, 7.0%; □, 9.1%; ●, 11.1%; ○, 12.7%; +, 14.5%; △, 16.9%; −, 19.7%; *, 21.0%; ×, 23.1%.

Theoretically, a family of straight lines relating ϵ'' and ρ should converge to a point whose Cartesian co-ordinates are very close to (0,0), i.e., when the sample container is empty, the loss factor approaches a value very close to zero, since air

is considered a lossless substance. Those straight lines relating loss factor and bulk density are shown in Fig. 10, and Table 2 lists the linear equations relating loss factor and bulk density for moisture contents in the range from 7.0 to 23.1%.

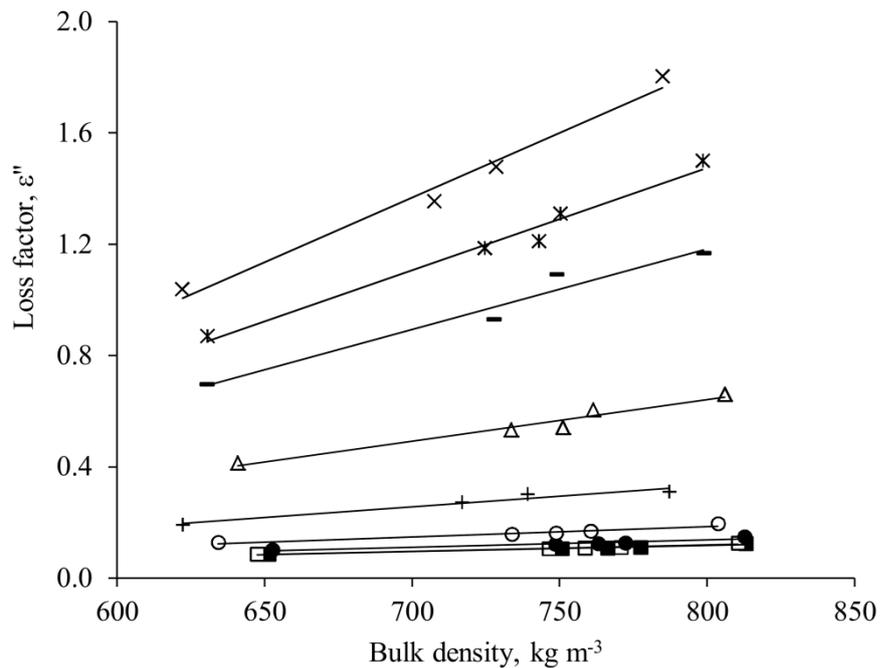


Fig. 8. Variation with grain bulk density of the loss factor of grain sorghum, hybrid BRS 310, at indicated moisture contents, 1 MHz, $22\pm 1^\circ\text{C}$ and $58\pm 5\%$ r.h. ■, 7.0%; □, 9.1%; ●, 11.1%; ○, 12.7%; +, 14.5%; △, 16.9%; —, 19.7%; *, 21.0%; ×, 23.1%.

The slopes of the straight lines representing the variation of the permittivity and loss factor with varying bulk density increase as moisture content increases. This is evidence that the influence of bulk density on the dielectric parameters is enhanced by moisture. All these findings are in accordance with results presented elsewhere. [6, 26, 27]

Direct comparison of the results described here with published data is rather difficult because of differences in variety, bulk density, and temperature. Nonetheless, measurements on grain sorghum of the hybrid CMSXS 769 are

compared in Fig. 11 to a curve plotted from dielectric data obtained by Nelson (1965), ^[39] the only source, to the authors' knowledge, to have previously investigated dielectric data on grain sorghum. It is seen that the values of permittivity reported by Nelson (1965) ^[39] on grain sorghum variety Martin at 12.5% w.b. moisture and 24 °C agree quite well with the results for grain sorghum hybrid CMSXS 769 at 12.8% moisture and 22 °C. The type of variation of the dielectric parameters of grain sorghum with frequency, moisture content, and bulk density is very similar to published data on other agricultural commodities.

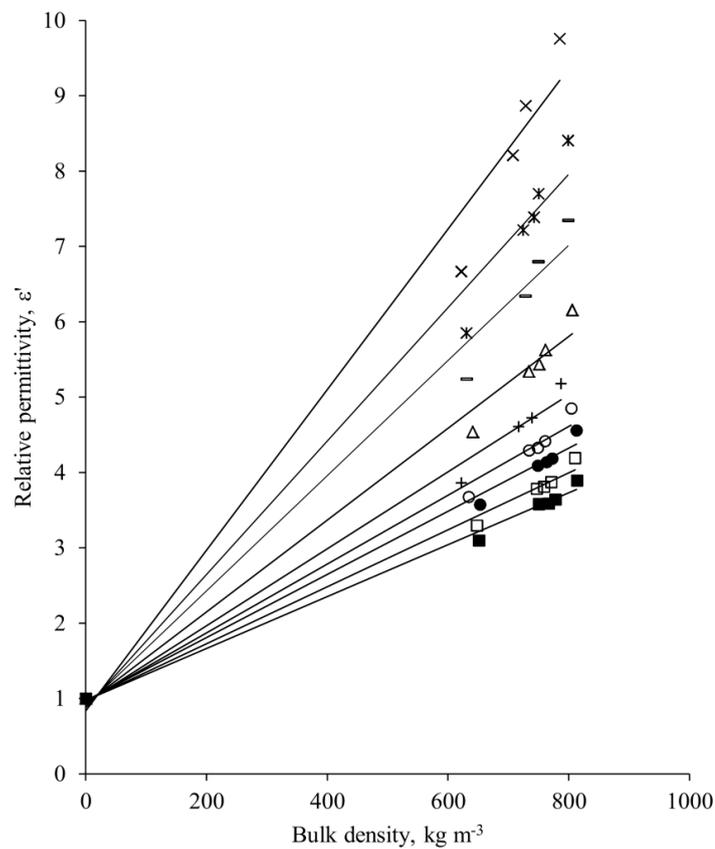


Fig. 9. Variation with grain bulk density of the relative permittivity of grain sorghum, hybrid BRS 310, at indicated moisture contents, 1 MHz, 22±1°C and 58±5% r.h., including Cartesian co-ordinates (0, 1). ■, 7.0%; □, 9.1%; ●, 11.1%; ○, 12.7%; +, 14.5%; △, 16.9%; -, 19.7%; *, 21.0%; x, 23.1%.

Sorghum hybrid also had some effect on the dielectric properties, and its influence upon ϵ' and ϵ'' is shown in Figs. 12 and 13, respectively, for samples at

15% moisture and an average bulk density of $745 \pm 5 \text{ kg m}^{-3}$. Permittivity varied from 4.90 to 5.39, while the loss factor varied from 0.3685 to 0.6070 at 0.5 MHz, 22 °C, and 65% relative humidity.

TABLE 1

Summary of linear regression analysis* of data relating the relative permittivity ϵ' and bulk density ρ for grain sorghum, hybrid BRS 310, at indicated moisture contents, $22 \pm 1^\circ\text{C}$ and $58 \pm 5\%$ r.h.

Moisture content % w.b.	Regression equation	Coefficient of determination r^2
7.0	$\epsilon' = 0.0034 \rho + 0.9750$	0.9947
9.1	$\epsilon' = 0.0038 \rho + 0.9707$	0.9938
11.1	$\epsilon' = 0.0042 \rho + 0.9687$	0.9936
12.7	$\epsilon' = 0.0046 \rho + 0.9558$	0.9911
14.5	$\epsilon' = 0.0051 \rho + 0.9440$	0.9894
16.9	$\epsilon' = 0.0061 \rho + 0.9313$	0.9885
19.7	$\epsilon' = 0.0076 \rho + 0.8985$	0.9848
21.0	$\epsilon' = 0.0089 \rho + 0.8699$	0.9825
23.1	$\epsilon' = 0.0107 \rho + 0.8348$	0.9778

* Regression equations were obtained considering that the lines converges to (0,1)

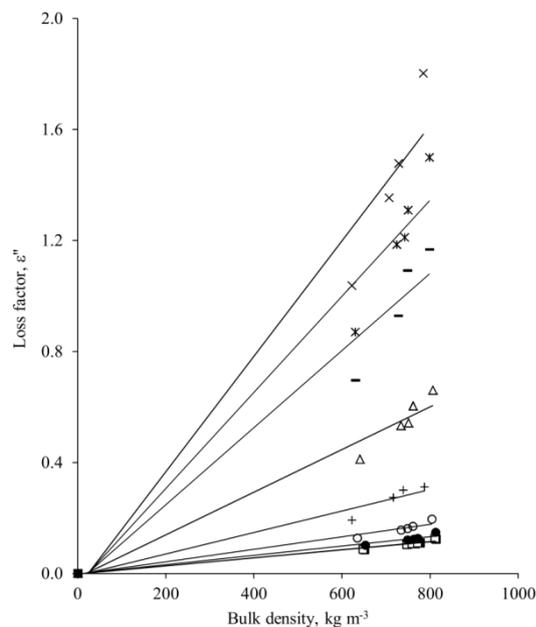


Fig. 10. Variation with grain bulk density of the loss factor of grain sorghum, hybrid BRS 310, at indicated moisture contents, 1 MHz, $22 \pm 1^\circ\text{C}$ and $58 \pm 5\%$ r.h. ■, 7.0%; □, 9.1%; ●, 11.1%; ○, 12.7%; +, 14.5%; △, 16.9%; -, 19.7%; *, 21.0%; ×, 23.1%.

TABLE 2

Summary of linear regression analysis* of data relating the loss factor ϵ'' and bulk density ρ for grain sorghum, hybrid BRS 310, at indicated moisture contents, $22\pm 1^\circ\text{C}$ and $58\pm 5\%$ r.h.

Moisture content % w.b.	Regression equation	Coefficient of determination r^2
7.0	$\epsilon'' = 0.0001 \rho - 0.0015$	0.9883
9.1	$\epsilon'' = 0.0001 \rho - 0.0017$	0.9846
11.1	$\epsilon'' = 0.0002 \rho - 0.0018$	0.9834
12.7	$\epsilon'' = 0.0002 \rho - 0.0032$	0.9798
14.5	$\epsilon'' = 0.0004 \rho - 0.0075$	0.9631
16.9	$\epsilon'' = 0.0008 \rho - 0.0146$	0.9670
19.7	$\epsilon'' = 0.0014 \rho - 0.0310$	0.9543
21.0	$\epsilon'' = 0.0017 \rho - 0.0404$	0.9557
23.1	$\epsilon'' = 0.0021 \rho - 0.0493$	0.9484

* Regression equations were obtained considering that the lines converges to (0,0)

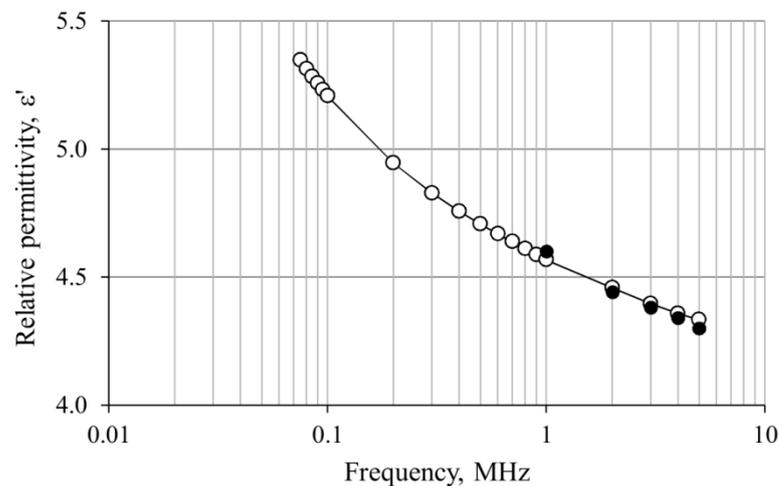


Fig. 11. Comparison of the variation of permittivity with frequency as reported by Nelson (1965) (●) for Martin grain sorghum at 12.5% w.b. moisture, loose fill bulk density, and 24°C , with the results reported in the present work for the CMSXS 769 hybrid (O) at 12.8% w.b. moisture, 754 kg m^{-3} , 22°C and 62% relative humidity.

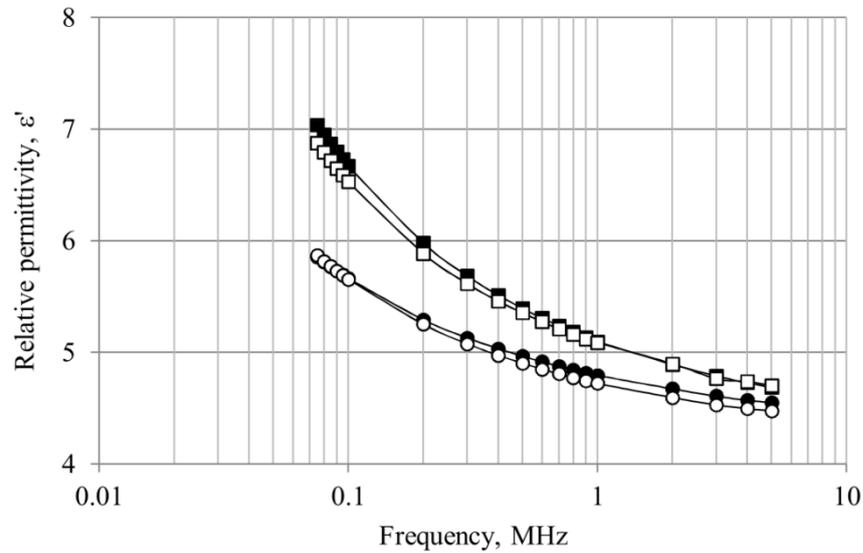


Fig. 12. Effect of hybrid type upon the permittivity of grain sorghum at 15% moisture, 22 °C, 65% r.h., and indicated values of bulk density. ●, BRS 308 (748 kg m⁻³); ○, BRS 310 (739 kg m⁻³); ■, BRS 655 (741 kg m⁻³); □, CMSXS 769 (750 kg m⁻³).

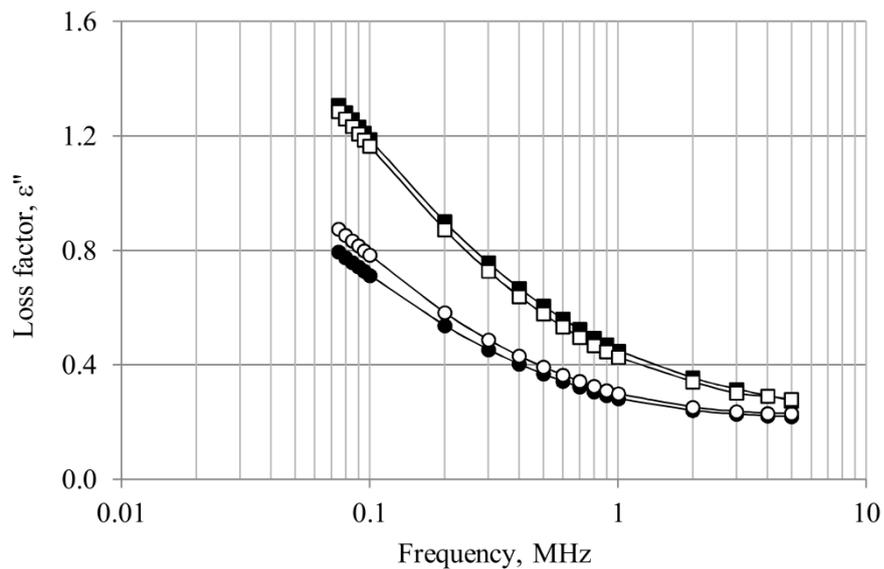


Fig. 13. Effect of hybrid type upon the loss factor of grain sorghum at 15% moisture, 22 °C, 65% r.h., and indicated values of bulk density. ●, BRS 308 (748 kg m⁻³); ○, BRS 310 (739 kg m⁻³); ■, BRS 655 (741 kg m⁻³); □, CMSXS 769 (750 kg m⁻³).

These variations correspond to relative changes of 10% in permittivity and 64% in loss factor. It can be seen in Figs. 12 and 13 that the highest values of permittivity and loss factor occurred for the hybrids BRS 655 and CMSXS 769, whereas the lowest corresponding values were obtained with the hybrids BRS 308 and BRS 310, in the whole range of frequencies studied. The shapes of the curves representing the variation of loss factor on frequency were as regular as those representing the variation of permittivity on frequency for the four hybrids.

Although sorghum varieties may differ in their chemical analysis, it is unlikely that a slight change in chemical composition within different varieties may affect significantly the dielectric properties, since most organic compounds are non-polar. The effect of sorghum hybrid on ϵ' and ϵ'' values may be accounted for by the differences in physical properties of the kernels associated with each hybrid. According to Kupfer (1996),^[40] at higher frequencies the size of the grains within bulk samples of granular materials influences absorption and scattering of the electromagnetic field, thus affecting their dielectric properties. For similar values of bulk density, the measured values of capacitance and conductance increased as a result of larger grain dimensions, thus increasing ϵ' and ϵ'' values. Indeed, the largest kernel dimensions (length x width x thickness) occurred for the hybrids BRS 655 (5.02 x 4.74 x 2.65 mm) and CMSXS 769 (4.90 x 4.18 x 2.67 mm), whereas the smallest corresponding values were obtained with the hybrids BRS 308 (3.80 x 3.48 x 1.95 mm) and BRS 310 (3.65 x 3.32 x 1.96 mm).

3.2.4. CONCLUSIONS

Measurements of the dielectric properties of grain sorghum revealed that its permittivity was a function of grain moisture content, bulk density, hybrid, and frequency of the applied electric field. The value of relative permittivity ϵ' , at given moisture contents and for similar values of bulk density, decreased regularly with increasing frequency. The dependence of the loss factor ϵ'' upon frequency was less regular than that of permittivity, and appeared as either upward or downward facing parabolic curves (depending on moisture) on a semi log plot. Relative permittivity increased with moisture content at every frequency where

measurements were taken. The regression of moisture content on ϵ' and ϵ'' yielded cubic models with coefficients of determination very close to unity. The changes in permittivity and loss factor as a result of changes in moisture content were greater at lower rather than higher frequencies. A region of possible dielectric dispersion was noticed in the moisture content range from 13 to 15% w.b. Straight lines were the best fit regression models representing the variation of ϵ' and ϵ'' on bulk density, with increasing slopes as moisture increases. Hybrid also had an effect on the dielectric parameters, with small-grain sorghum hybrids producing lower values of both ϵ' and ϵ'' as compared to large-grain hybrids.

3.2.5. ACKNOWLEDGEMENTS

This research work has been sponsored by The Rio de Janeiro State Research Foundation FAPERJ, The Brazilian National Council for Scientific and Technological Development CNPq, Minas Gerais State Research Foundation FAPEMIG, International Foundation for Science IFS, and Post-Graduate Federal Agency CAPES. Thanks are due to Mr. José Avelino Santos Rodrigues of The Maize & Sorghum Research Centre of The Brazilian Agricultural Research Corporation, EMBRAPA, who provided seed lots of the four sorghum hybrids used in this experiment.

3.2.6. REFERENCES

1. Brooker, D.B; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C.W. Drying and Storage of Grains and Oilseeds; Van Nostrand Reinhold: New York, 1992.
2. Stenning, B.C.; Berbert, P.A. On line moisture content measurement. In Cereal Quality III, Cambridge, UK, December 13–15, 1993; 443–455.
3. Liu, Q.; Bakker-Arkema, F.W. Automatic control of crossflow grain driers, Part 1: Development of a process model. *Journal of Agricultural Engineering Research* **2001**, 80 (1), 81–86.
4. Dufour, P. Control engineering in drying technology: Review and trends. *Drying Technology* **2006**, 24 (7), 889–904.
5. Parry, J.L. Mathematical modelling and computer simulation of heat and

- mass-transfer in agricultural grain drying – A review. *Journal of Agricultural Engineering Research* **1985**, 32 (1), 1–29.
6. Meyer, W.; Schilz, W. A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids. *Journal of Physics D: Applied Physics* **1980**, 13 (10), 1823–1830.
 7. Berbert, P.A.; Stenning, B.C. On-line moisture content measurement of wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research* **1996**, 65 (4), 287–296.
 8. Kraszewski, A.W.; Trabelsi, S.; Nelson, S.O. Comparison of density-independent expressions for moisture content determination in wheat at microwave frequencies. *Journal of Agricultural Engineering Research* **1998**, 71 (3), 227–237.
 9. Berbert, P.A.; Molina, M.B.; Viana, A.P.; Carlesso, V.O.; Oliveira, M.T.R. Meyer and Schilz function to estimate common bean seed water content evaluated by radiofrequency. *Scientia Agricola* **2007**, 64 (6), 569–574.
 10. McIntosh, R.B.; Casada, M.E. Fringing field capacitance sensor for measuring the moisture content of agricultural commodities. *IEEE Sensors Journal* **2008**, 8 (3), 240–247.
 11. Jafari, F.; Khalid, K.; Yusoff, W.M.D.W.; Hassan, J. The analysis and design of multi-layer microstrip moisture sensor for rice grain. *Biosystems Engineering* **2010**, 106 (3), 324–331.
 12. Kandala, C.V.; Sundaram, J. Nondestructive measurement of moisture content using a parallel-plate capacitance sensor for grain and nuts. *IEEE Sensors Journal* **2010**, 10 (7), 1282–1287.
 13. Nelson, S.O. RF and microwave dielectric properties of shelled, yellow-dent field corn. *Transactions of the ASAE* **1979**, 22 (6), 1451–1457.
 14. Sacilik, K.; Colak, A. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. *Powder Technology* **2010**, 203 (2), 365–370.
 15. Noh, S.H.; Nelson, S.O. Dielectric properties of rice at frequencies from 50 Hz to 12 GHz. *Transactions of the ASAE* **1989**, 32 (3), 991–998.
 16. Prasad, A.; Singh, P.N. A new approach to predicting the complex permittivity of rice. *Transactions of the ASABE* **2007**, 50 (2), 573–582.

17. Nelson, S.O.; Stetson, L.E. Frequency and moisture dependence of dielectric properties of hard red winter-wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research* **1976**, 21 (2), 181–192.
18. Berbert, P.A.; Stenning, B.C. Analysis of density-independent equations for determination of moisture content of wheat in the radiofrequency range. *Journal of Agricultural Engineering Research* **1996**, 65 (4), 275–286.
19. 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 the ASAE* **2003**, 46 (3), 861–867.
20. Chala, A.; Tronsmo, A.M.; Brurberg, M. B. Genetic differentiation and gene flow in *Colletotrichum sublineolum* in Ethiopia, the centre of origin and diversity of sorghum, as revealed by AFLP analysis. *Plant Pathology* **2011**, 60 (3), 474–482.
21. Pennisi, E. How sorghum withstands heat and drought. *Science* **2009**, 323 (5914), 573.
22. Wang, M.L.; Zhu, C.; Barkley, N.A.; Chen, Z.; Erpelding, J.E.; Murray, S.C.; Tuinstra, M.R.; Tesso, T.; Pederson, G.A.; Yu, J. Genetic diversity and population structure analysis of accessions in the US historic sweet sorghum collection. *Theoretical and Applied Genetics* **2009**, 120 (1), 13–23.
23. Food and Agriculture Organization of The United Nations. 2012. Statistics Division FAOSTAT. Production: Crops. Available at: <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx #ancor> [June 18, 2012].
24. Sasaki, T.; Antonio, B.A. Plant genomics: Sorghum in sequence. *Nature* **2009**, 457 (7229), 547–548.
25. Whitfield, M.B.; Chinn, M.S.; Veal, M.W. Processing of materials derived from sweet sorghum for biobased products. *Industrial Crops and Products* **2012**, 37 (1), 362–375.
26. Berbert, P.A.; Queiroz, D.M.; Melo, E.C. Dielectric properties of common bean. *Biosystems Engineering* **2002**, 83 (4), 449–462.
27. Berbert, P.A.; Queiroz, D.M.; Sousa, E.F.; Molina, M.B.; Melo, E.C. Dielectric properties of parchment coffee. *Journal of Agricultural Engineering Research*

- 2001**, 80 (1), 65–80.
28. International Seed Testing Association ISTA. Determination of moisture content. In *International Rules for Seed Testing*; ISTA: Bassersdorf, 2010; 9-1 – 9-20.
 29. Griffin, J.D.; Skochdopole, R. Plastic foams. In *Engineering Design for Plastics*; Baer, E., Ed.; Reinhold Publishing Co.: New York, 1964; 995–1071.
 30. Mwithiga, G.; Sifuna, M.M. Effect of moisture content on the physical properties of three varieties of sorghum seeds. *Journal of Food Engineering* **2006**, 75 (4), 480–486.
 31. Subramanian, S.; Viswanathan, R. Bulk density and friction coefficients of selected minor millet grains and flours. *Journal of Food Engineering* **2007**, 81 (1), 118–126.
 32. DeVoe, D.R.; Bruswitz, G.H.; Stone, M.L. Quantitative importance of bulk density when using dielectric measurements to predict percent moisture of hard red winter wheat. In *Proceedings of the Summer Meeting of The American Association of Agricultural Engineers*, East Lansing, USA, June 23–26, 1985; Paper 85-3027.
 33. Stephens, L.E.; Foster, G.H. Bulk properties of wheat and grain sorghum as affected by a mechanical grain spreader. *Transactions of the ASAE* **1978**, 15 (1), 1217–1218, 1221.
 34. Chang, C.S.; Shackelford, L.E.; Lai, F.S.; Martin, C.R., Miller, B.S. Bulk properties of corn as affected by multiple-point grain spreaders. *Transactions of the ASAE* **1981**, 34 (4), 1632–1636.
 35. Wilcke, W.F.; Bern, C.J. Natural-air corn drying with stirring: I. Physical properties effects. *Transactions of the ASAE* **1986**, 29 (3), 854–1859.
 36. Sacilik, K.; Tarimci, C.; Colak, A. Moisture content and bulk density dependence of dielectric properties of safflower seed in the radio frequency range. *Journal of Food Engineering* **2007**, 78 (4), 1111–1116.
 37. Kraszewski, A.W. Microwave aquametry: Introduction to the workshop. In *Microwave Aquametry: Electromagnetic Wave Interaction with Water-Containing Materials*; Kraszewski, A.W., Ed.; IEEE Press: New York, 1996;

- 3–34.
38. Kraus, J.D.; Carver, K.R. *Electromagnetics*; McGraw-Hill Kogakusha Ltd: Tokyo, 1973.
 39. Nelson, S.O. Dielectric properties of grain and seed on the 1 to 50–MC range. *Transactions of the ASAE* **1965**, 8 (1), 38–48.
 40. Kupfer, K. Possibilities and limitations of density-independent moisture measurement with microwaves. In *Microwave Aquametry: Electromagnetic Wave Interaction with Water-Containing Materials*; Kraszewski, A.W., Ed.; IEEE Press: New York, 1996; 313–327.

3.3. Trabalho 3: Performance Analysis of RF Dielectric Models for Density-Independent Estimation of Moisture Content in Sorghum

Highlights

- ▶ On-line sensing of flowing grain moisture is important to improve milling efficiency.
- ▶ As feed mc is difficult to measure, it is seldom available in the milling industry.
- ▶ A reliable solution is the use of density-independent dielectric functions.
- ▶ The effectiveness of three dielectric models for sorghum mc measurement was assessed.
- ▶ Measurement of ε' and $\ln(\varepsilon'')$ at 5 MHz gave the best predictions for sorghum mc.

ABSTRACT. Precise on-line and bulk-density independent monitoring of moisture content in processing grain into flour is important information to improve the milling process efficiency and to obtain a high quality final product. However, since feed moisture content is difficult to measure, it is nearly never available in the milling industry. This work addresses a reliable solution to reduce the deleterious effect of the mass flow rate on the estimation of grain sorghum moisture content, a method which is based on the high correlation between grain moisture content and two of its dielectric properties, i.e., relative permittivity ε' , and loss factor ε'' . Thus, the object of this paper was to analyse the effectiveness of three dielectric models for estimation of sorghum moisture content at excitation frequencies in the range from 75 kHz to 5 MHz, for moisture contents from 13 to 23% w.b., and bulk densities

ranging from 575 to 818 kg m⁻³. Goodness of fit between experimental and predicted values of moisture content was based on the following statistical parameters: coefficient of multiple determination, standard error of calibration, worst-case error, root mean squared error, mean absolute percentage error, mean bias, fit index, and reduced chi-squared. Residual plot analysis and the principle of parsimony were also considered in the selection of the most effective dielectric model. The model based on the measurement of ϵ' and $\ln(\epsilon'')$ at 5 MHz gave the best predictions of sorghum moisture content for the conditions studied.

Keywords

Density-independent; Moisture content; *Sorghum bicolor* (L.) Moench; permittivity; loss factor; RF range.

3.3.1. INTRODUCTION

Accurate on-line estimation of moisture content of flowing grain is a fundamental requirement for the development of an efficient and reliable automatic control system for grain driers [1]. Apart from energy saving considerations, other main goals would be the achievement of a better final quality product and the reduction of operational costs by lessening skilled labour requirements, provided a moisture sensor could be built at an affordable cost for an agricultural market. Harvest, processing of grain into flour, and storage are other agricultural activities that could benefit from on-line moisture content measurement [2]. The importance of a reliable real-time sensing of moisture content as grain is being combined for accurate yield determination in precision agriculture has been described by Nelson [3].

Although on-line instrumentation has been commercially available for many years, the continuous challenge to the technology is to develop a density-independent moisture meter. Earlier attempts to achieve instantaneous, non-destructive, and density-independent estimation of grain moisture content have been restricted to the use of mechanical means of controlling the mass flow rate of a stream of grain, and hence its bulk density. Nonetheless, most of these

attempts have failed to provide a solution with the degree of accuracy needed in commercial operations, since it is very difficult, if not impossible, to control the bulk density of a stream of grain.

Other methods have been proposed to reduce or eliminate the deleterious effect of bulk density during on-line grain moisture content measurement and it is generally accepted that the only reliable solution is the use of density-independent dielectric functions. These functions relate the moisture content of a material to the real and imaginary parts of its complex dielectric permittivity, $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, where ϵ' is the relative permittivity and ϵ'' is the loss factor. ϵ' represents the ability of a material to store electric energy, and ϵ'' describes the loss of electric field energy in the material. In granular agricultural products both ϵ' and ϵ'' are highly correlated with moisture content [4].

Research workers seeking means of reducing or eliminating the effect of grain mass flow rate on moisture estimation have largely chosen to pursue the development of the microwave method of moisture measurement as the basis for the sensing device [5–9]. It has been argued that because of the reduced effects of ionic conductivity and the elimination of physical contact between the sample and the sensing device, the microwave method has greater potential for yielding density-independent equations than the RF conductance and capacitance technique. Researchers also expected the costs involved in the design of microwave circuitry to reduce more than they have done over the last few years. However, grain moisture estimation techniques based on RF impedance measurements still seem to attract the attention of many researchers [10–14] and the reasons for this are not hard to find. With the appropriate choice of electrodes, a sample of considerable volume can be sensed; the moisture content can be monitored continuously and can be easily compensated to take account of sample temperature. It has also been verified theoretically and experimentally that accurate density-independent calibration functions can be derived to monitor the moisture content of static and moving samples of grain at radio frequencies using the capacitance method [15, 16].

In order to design a comprehensive capacitive sensor for on-line grain moisture content estimation in automatic control operations, dielectric data for a number of cereal grains, pulses, oilseeds and coffee are required. Indeed, studies of the dielectric properties of cereal grains such as corn [17, 18], rice [19, 20], wheat [21, 22], barley [11], of oilseeds like soybean [10, 23], flaxseed [24], and peanut [25], of common bean [26] and of parchment coffee [27] have been conducted over the last forty years, using either radiofrequency or microwave aquametry, a fundamental step towards the development of on-line density-independent models for moisture content estimation.

However, of the major cereal crops produced worldwide, only grain sorghum has not yet been fully characterised through its dielectric properties. Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is an indigenous African grass, with Ethiopia regarded as one of the sources of origin and the major centre of diversity for the species [28]. The crop presents high water use efficiency for growing in high temperature and drought-prone areas and due to its high tolerance of semi-arid environments and nutrient-poor soils it is capable of enduring subpar growing conditions [29, 30]. Sorghum is the fifth most important cereal crop in the world, in terms of both production (55.7 million tonnes) and harvested area (40.5 million ha) [31]. Although its production is less than that of the other major cereal crops, it is nonetheless a staple for both humans (grain sorghum for starch) and livestock (sorghum for forage and silage), and is also grown for syrup and bio-ethanol production (sweet sorghum) [32, 33].

Density-independent dielectric models developed by Kraszewski and Kulinski [34], McFarlane [35] and Lawrence and Nelson [36] have been proved successful for moisture estimation of wheat either at radio or microwave frequencies. Therefore, the object of the research work described in this paper was to analyse the effectiveness of these three different models for sorghum moisture content measurement under static conditions as a preliminary step towards the development of a density-independent method capable of evaluating its moisture content continuously, and on-line, at excitation frequencies in the range 75 kHz to 5 MHz, for moisture contents between 13 and 23% w.b. It is relevant to state here that the effectiveness of dielectric models which employ the

Meyer and Schilz function [5], i.e., $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ for grain sorghum density-independent moisture estimation will be assessed in a forthcoming paper.

3.3.2. MATERIAL AND METHODS

3.3.2.1. Sample container and measuring principle

The description of the sample container used to determine the dielectric properties of grain sorghum in this study can be found elsewhere [26]. The two parameters of the complex relative permittivity of the sample material, $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, were calculated from measurements of the equivalent parallel capacitance and the conductance of the sample container, both empty and filled with a grain sample. A detailed description of the measuring principle used in this work can be found in a previous paper [27].

3.3.2.2. Equipment and procedures

A Hewlett-Packard model 4285A Precision LCR Meter was used for measuring the dielectric properties of grain sorghum samples in the frequency range from 75 kHz to 5 MHz. The instrument can measure complex impedance, $|Z|e^{j\theta}$, and derived electric parameters of LCR components over the frequency range from 75 kHz to 30 MHz using test signal levels from 5 mV_{rms} to 2 V_{rms} with a basic accuracy of $\pm 0.1\%$. Measurements were taken with the voltage level set at 1.0 V_{rms} at intervals of 5 kHz from 75 kHz to 100 kHz; 100 kHz from 100 kHz to 1 MHz; 1 MHz from 1 MHz to 5 MHz. An Agilent 82357B USB/GPIB interface converter was used to provide a direct interface connection from the GPIB measuring instrument to a USB computer port. Automated data collection was performed using LabVIEW[®] software.

3.3.2.3. Grain sorghum samples

Certified seeds of two commercial grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) hybrids, BRS 308 and BRS 310, and of two forage sorghum hybrids,

CMSXS 769 (experimental) and BRS 655 (commercial), were used for measurements of dielectric properties. Seed lots were obtained from the Maize & Sorghum Research Centre of the Brazilian Agricultural Research Corporation, EMBRAPA, after harvest in 2011. In order to maintain its original characteristics the sorghum, initially at 13% w.b. moisture content, was stored in polyethylene bags in a controlled-environment chamber at 4 °C prior to any conditioning. The moisture content of 0.6 kg sub samples of each hybrid was artificially raised from 13 to 23% in increments of approximately two percentage points moisture by adding the required amount of distilled water. All measurements were taken at room temperature, 23 ± 1 °C, and $63\pm 6\%$ relative humidity (r.h.), respectively. Determination of moisture content was made on a wet basis and was carried out according to the International Rules for Seed Testing [37].

In order to assess the influence of bulk density when predicting sorghum moisture content from its dielectric parameters, the procedure described by Berbert et al. [22] was employed, whereby four different levels of bulk density could be obtained for seed samples at the same moisture content level. To achieve an additional controlled reduction in the bulk density of the measured samples, the seeds were thoroughly mixed with predetermined amounts of expanded polystyrene beads, approximately the same shape and size as the sorghum seed, which have a permittivity very close to that of air: 1.017 from 1 kHz to 1 GHz [38]. Polystyrene foam is also an extremely low loss material over the same frequency range, with a value for the loss factor ϵ'' of 0.0001, and as a result of this the material is unlikely to introduce spurious effects on the accuracy of loss factor measurements of samples of grain sorghum. Confirmation that the permittivity of the beads closely equates to that of the intergranular air, which the beads simulated, was obtained from preliminary tests in which the concentric sample cell was filled with the beads and capacitance measurements made at frequencies over the range 75 kHz to 5 MHz. The procedure described above provided the lowest level of bulk density achieved in the present work.

Bulk density was calculated by dividing the sample weight by the known volume of the sample container. As a rule, three replications were performed at

each combination of moisture content and bulk density levels, using the same sub-sample of sorghum seed each time. The dielectric properties calculated from the network output signals were averaged. Samples were allowed to reach room temperature before the electrical measurements were made. This was accomplished by removing the Kilner jars from refrigerated storage for at least 4 h prior to the beginning of each measurement sequence. For high moisture sorghum samples, moisture content was determined before and after the electrical measurements in order to verify the need for moisture corrections because of possible natural drying of the samples during measurements. In practice, the change of moisture was always negligibly small (less than 0.3 percentage point moisture), and so no correction was needed.

3.3.2.4. Methods for the derivation of density-independent equations for moisture content determination in sorghum

3.3.2.4.1. A single dielectric parameter (ϵ') measured at two frequencies (f_1 and f_2)

McFarlane [35], based on previous work by Dzhemella and Pustynnikov [39], reported a method to reduce the effects of density variation on the accuracy of wheat moisture content determination. The basis of the method was the solution of simultaneous equations involving the relative permittivity of the product measured at two frequencies. The method works as follows: The relationship between relative permittivity ϵ' , moisture content M (% wet basis), and bulk density ρ (kg m^{-3}) at 0.1 and 10 MHz were found to be

$$\epsilon'_{(0.1 \text{ MHz})} = 0.559M + 0.00698\rho - 9.27 \quad (1)$$

$$\epsilon'_{(10 \text{ MHz})} = 0.144M + 0.00506\rho - 2.29 \quad (2)$$

Eliminating ρ and rearranging in terms of M , the following two-frequency equation for predicting moisture content was obtained

$$M = 2.78 \varepsilon'_{0.1 \text{ MHz}} - 3.83 \varepsilon'_{10 \text{ MHz}} + 17.00 \quad (3)$$

Eq. (3) was found to predict the measured wheat moistures with a standard deviation of 0.6 percentage point moisture, and a worst case error of 1.0 percentage point moisture. In the present work, a dielectric model similar to Eq. (3), i.e., $M = F(\varepsilon'_{f_1}, \varepsilon'_{f_2})$ will be tested for sorghum moisture content estimation.

3.3.2.4.2. Two dielectric parameters (ε' and ε'') measured at two frequencies (f_1 and f_2)

Stetson and Nelson [40] suggested that due to the irregular variation of the loss factor at low frequencies, the use of ε'' in attempting to estimate grain moisture content was doomed to failure. Nelson [41] stated that the predominance of moisture meters which are sensitive mainly to the permittivity is due to the fact that the permittivity exhibits less variability among different lots of grain than does the loss factor. However, Lawrence and Nelson [36] suggested that, owing to the linearity between $\ln(\varepsilon'')$ and the mass of water in wheat at 1 MHz, the introduction of the natural logarithm of the loss factor as a covariable would improve the performance of the prediction equation. Thus, the linearity between $\ln(\varepsilon'')$ and the mass of water in sorghum will be tested at different frequencies in the present study and the goodness of fit of the following bulk density-independent dielectric model for moisture estimation will be assessed.

$$M = F[\varepsilon'_{f_1}, \ln(\varepsilon''_{f_1}), \varepsilon'_{f_2}, \ln(\varepsilon''_{f_2})] \quad (4)$$

3.3.2.4.3. Measurement of two dielectric parameters (ϵ' and ϵ'') at a single frequency

Kraszewski and Kulinski [34] used the well-known definition of moisture content as the starting point to derive a calibration equation which allowed a density-independent estimation of the moisture content of particulate materials in the microwave frequency range. The *fractional* moisture content, m , in decimal (wet basis), is defined as

$$m = \frac{W_w}{W_w + W_d} = \frac{\frac{W_w}{v}}{\frac{W_w + W_d}{v}} = \frac{\zeta}{\rho} \quad (5)$$

where W_w and W_d are the weight of water and the weight of dry matter, respectively, in a given volume, v , occupied by the wet sample; ζ is the water concentration per unit volume, and ρ is the bulk density of the moist material. The more frequently used *relative* moisture content, percent (wet basis), is given by $M = 100m$.

Changes in the capacitance of the sample container filled with moist grain, regardless of the frequency of the applied field, are proportional to the water concentration, ζ , and are expected to be affected only to a small extent by the mass of dry matter. According to Kraszewski and Nelson [42], if ζ can be correlated to the measured electrical parameter, it becomes apparent from Eq. (5) that an accurate determination of moisture content, m , requires the bulk density of the wet material, ρ , to be known. Any variation of the bulk density, for a given volume of grain at the same moisture content, will be interpreted as a change in the water concentration, resulting in a measurement error. Thus, keeping a constant mass or density of the wet material in the measuring space is the only way to cancel the bulk density variation effect during calibration procedures as well as during actual measurements. This is the reason why most capacitance-based grain moisture meters require the use of samples of constant weight. Such

requirements are very difficult to accomplish during continuous on-line moisture content measurement on a free flowing stream of loose material. Attempts to reduce fluctuations of bulk density within acceptable limits in a moving column of grain by mechanical means, such as vibration of the sample during the measurements, have failed to provide accurate estimations of grain moisture content. Kraszewski and Kulinski [34] used the following functions to separate the effect of the dielectric parameters of water from the effect of the dry material during moisture content measurement.

$$\varepsilon' = F_1(W_w, W_d) \text{ and } \varepsilon'' = F_2(W_w, W_d) \quad (6)$$

If it is possible to solve the two equations by separation of variables, the mass of water and the mass of dry matter could be written as

$$W_w = F_3(\varepsilon', \varepsilon'') \text{ and } W_d = F_4(\varepsilon', \varepsilon'') \quad (7)$$

Thus, substituting the previous analytical expressions into the definition of *fractional* moisture content given by Eq. (5), and combining the result with the expression defining the *relative* moisture content ($M = 100m$), a simple expression for the moisture content can be derived in a form which contains only the experimentally measured dielectric parameters. The general form of Eq. (8) suggests that the moisture content determined according to this expression may be estimated without taking into account the effects caused by variations in grain bulk density.

$$M = \left[\frac{F_3(\varepsilon', \varepsilon'')}{F_3(\varepsilon', \varepsilon'') + F_4(\varepsilon', \varepsilon'')} \right] 100 \quad (8)$$

3.3.2.5. Statistical analysis

Multiple regression analysis was performed using Statistica™ software v. 8.0. The degree of suitability of the models used to describe the phenomenon studied was evaluated through the calculation with the following statistical parameters and according to the following criteria: 1. Higher values of the coefficient of multiple determination R^2 ; 2. Lower values of the standard error of calibration (SEC); 3. Minimum absolute worst-case error (Δ_{\max}); 4. Lower values of the root mean squared error (RMSE); 5. Lower values of the mean absolute percentage error (η); 6. Smaller range of average bias (ξ); 7. Fit index (δ) closer to unity, and 8. Lower values of the reduced chi-squared (χ^2).

Moreover, the choice of appropriate models was based on the analysis of error dispersion, and taking into account the Principle of Parsimony. When different mathematical models are capable of describing the same physical phenomenon with different levels of complexity, the Principle of Parsimony must be considered. This principle states that one should not multiply entities unnecessarily in parametric model fitting, or make more assumptions than are needed, and in general that one should use no more complex a model or representation of reality than absolutely necessary [43].

Eqs. (9) to (15) presented below were used to calculate R^2 [44], SEC [45], RMSE [46], η [47], ξ [46], δ [48], and [49] χ^2 . In Eq. (14), $|M'_{\text{est},i}| = M_{\text{est},i} - \bar{M}_{\text{exp}}$ and $|M'_{\text{exp},i}| = M_{\text{exp},i} - \bar{M}_{\text{exp}}$. In Eqs. (10) and (15), n is the number of independent variables in the regression model.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{\text{est},i} - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^N (M_{\text{exp},i} - \bar{M})^2} \quad (9)$$

$$\text{SEC} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{\text{exp},i} - M_{\text{est},i})^2}{N - n - 1}} \quad (10)$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{\text{exp},i} - M_{\text{est},i})^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|M_{\text{exp},i} - M_{\text{est},i}|}{M_{\text{exp},i}} \right) \quad (12)$$

$$\xi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{\text{est},i} - M_{\text{exp},i}) \quad (13)$$

$$\delta = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (M_{\text{est},i} - M_{\text{exp},i})^2}{\sum_{i=1}^N (|M'_{\text{est},i}| + |M'_{\text{exp},i}|)^2} \right], 0 \leq \delta \leq 1 \quad (14)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^N (M_{\text{exp},i} - M_{\text{est},i})^2 \quad (15)$$

3.3.3. RESULTS AND DISCUSSION

3.3.3.1. Reduction of the bulk density effect by simultaneous measurement of dielectric parameters at two frequencies

3.3.3.1.1. A single dielectric parameter (ϵ') measured at two frequencies

Multiple regression analyses such as those reported by McFarlane [35] were performed to correlate relative permittivity with moisture content (13% to 23% w.b.) and bulk density (575 to 818 kg m⁻³). Functions $M = F(\epsilon', \rho)$ and $\rho = F(\epsilon', M)$ were examined at 29 frequencies from 75 kHz to 5 MHz. The coefficients of determination of the functions $M = F(\epsilon', \rho)$ ranged from 0.88 (at 0.75 kHz) to 0.93 (at 5 MHz). However, it was only at 5 MHz that the function $\rho = F(\epsilon', M)$ yielded a reasonable coefficient of determination (0.87), with poor values ($R^2 < 0.60$) obtained at all other frequencies. After having these disappointing results, no attempt was made to further adapt the method proposed by McFarlane [35], which

postulates that the function $\rho = F(\varepsilon', M)$ must have high values of R^2 at two frequencies at the least. Indeed, owing to the fact that this semi-empirical approach to solve the analytical expressions by separation of variables does not have a sound statistical basis, multiple regression analysis was performed to relate moisture content directly to relative permittivity values measured at selected pairs of frequencies, and the resulting density-independent equations obtained are listed in Table 1. Considering that, for a given change in moisture content, changes in relative permittivity values are larger at low frequencies than at higher frequencies, the following equation was selected to represent the one-parameter, two-frequency model that will be compared to the other dielectric models for moisture estimation.

$$M = 1.043594 \varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.034881 \varepsilon'_{0.075\text{MHz}} + 2.393574 \quad (16)$$

Regression analyses also showed the relative permittivity of sorghum to be a linear function of grain moisture content and grain bulk density in the frequency range studied. Linearity of the square root and cube root of the relative permittivity with moisture content and bulk density were also observed, but no differences were noted between the coefficients of determination of the quadratic and cubic models and those obtained using the unmodified relative permittivity value. For example, at 5 MHz, the following equations were obtained, with coefficients of determination in the range 0.91 – 0.93. These results indicate that 9% of the variation of relative permittivity values could not be accounted for by the independent variables, namely, moisture content and bulk density.

$$\varepsilon' = 0.25669 M + 0.00815 \rho - 5.20438 \quad (17)$$

$$(\varepsilon')^{1/2} = 0.056035 M + 0.001800 \rho - 0.015868 \quad (18)$$

$$(\varepsilon')^{1/3} = 0.028307 M + 0.000915 \rho - 0.567214 \quad (19)$$

Table 1

Summary of regression analysis of data relating the relative permittivity ε' , moisture content ($13\% \leq M \leq 23\%$), and bulk density ($575 \leq \rho \leq 818 \text{ kg m}^{-3}$) for grain sorghum, hybrids BRS 308, BRS 310, BRS 655, and CMSXS 769, at indicated frequencies, $22.5 \pm 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ and $62.6 \pm 6\%$ relative humidity.

Frequency (MHz)	Regression equation	R ²
0.075 and 5.0	$M = 1.043594\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.034881\varepsilon'_{0.075\text{MHz}} + 2.393574$	0.84
0.080 and 5.0	$M = 1.055642\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.039344\varepsilon'_{0.080\text{MHz}} + 2.353132$	0.84
0.085 and 5.0	$M = 1.071080\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.042761\varepsilon'_{0.085\text{MHz}} + 2.302757$	0.84
0.090 and 5.0	$M = 1.088410\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.045040\varepsilon'_{0.090\text{MHz}} + 2.249008$	0.84
0.095 and 5.0	$M = 1.115537\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.043656\varepsilon'_{0.095\text{MHz}} + 2.173746$	0.83
0.100 and 5.0	$M = 1.134202\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.044994\varepsilon'_{0.100\text{MHz}} + 2.116164$	0.83
0.200 and 5.0	$M = 1.481588\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.048646\varepsilon'_{0.200\text{MHz}} + 1.024664$	0.83
0.300 and 5.0	$M = 1.707328\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.052579\varepsilon'_{0.300\text{MHz}} + 0.266254$	0.82
0.400 and 5.0	$M = 1.856918\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.062854\varepsilon'_{0.400\text{MHz}} - 0.271930$	0.82
0.500 and 5.0	$M = 1.955608\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 1.080697\varepsilon'_{0.500\text{MHz}} - 0.670130$	0.82

Introducing bulk density as a dependent variable, the following equation was obtained, with a coefficient of determination $R^2 = 0.91$, showing that bulk density has a significant effect when trying to estimate moisture content through the simultaneous measurement of relative permittivity at two frequencies.

$$M = 0.18276 \varepsilon'_{0.075\text{MHz}} + 2.90939 \varepsilon'_{5\text{MHz}} - 0.02781 \rho + 20.94743 \quad (20)$$

3.3.3.1.2. Two dielectric parameters (ϵ' and ϵ'') measured at two frequencies

The data for the four grain sorghum hybrids in the present work showed that the loss factor was indeed a useful indicator of the mass of water at 1 and 5 MHz. The coefficients of determination for the least squares regression lines varied from 0.88 to 0.96 at 1 MHz and from 0.88 to 0.98 at 5 MHz, respectively. The variation of $\ln(\epsilon'')$ with mass of water present in grain sorghum of the four hybrids, at 5 MHz, is shown in Fig. 1. Thus, it was inferred that $\ln(\epsilon'')$ would also be correlated with moisture content. In its final form, the following equations may be used to provide estimates of sorghum moisture content based on its measured dielectric parameters at two pair of frequencies (500 kHz, 5 MHz) and (1 MHz, 5 MHz) for moistures ranging from 13% to 23% w.b.

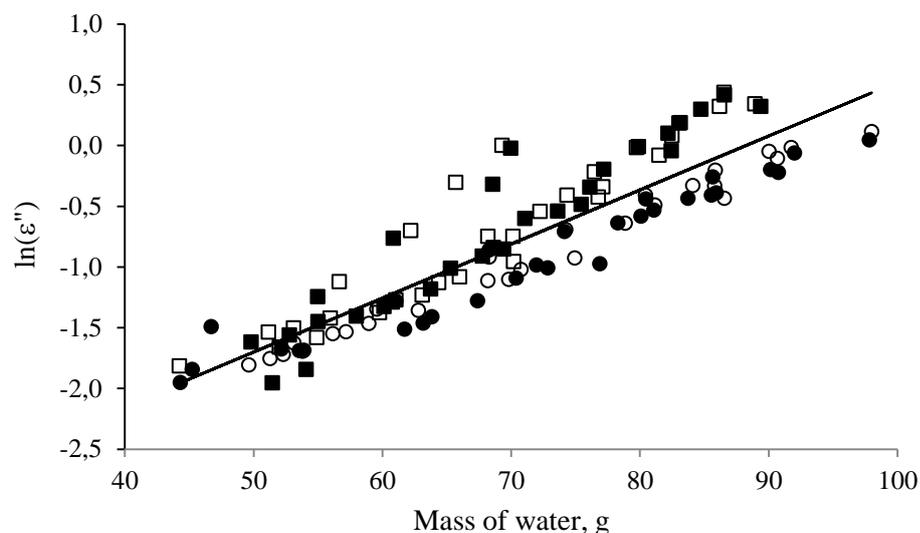


Fig. 1. Variation with mass of water of the natural logarithm of the loss factor at 5 MHz for hybrids BRS 308 (●), BRS 310 (○), BRS 655 (■), and CMSXS 769 (□).

$$M = -0.65190\epsilon'_{0.5\text{MHz}} + 0.15188 \ln(\epsilon'')_{0.5\text{MHz}} -$$

$$0.22644\epsilon'_{5\text{MHz}} + 7.08489 \ln(\epsilon'')_{5\text{MHz}} + 29.25013 \quad (21)$$

$$M = -0.55869\varepsilon'_{1\text{MHz}} + 0.63512 \ln(\varepsilon''_{1\text{MHz}} - 0.24277\varepsilon'_{5\text{MHz}} + 5.83619 \ln(\varepsilon''_{5\text{MHz}}) + 27.53590 \quad (22)$$

Eqs. (21) and (22) had coefficients of determination $R^2 = 0.89$ which closely resemble the value obtained when bulk density was introduced as a dependent variable, Eq. (20), which is an indication that Eqs. (21) and (22) may yield reasonable density-independent estimations of sorghum moisture content. The goodness of fit of these equations will be evaluated with a posteriori error analysis.

3.3.3.2. Reduction of the bulk density effect by measuring two dielectric parameters (ε' and ε'') at a single frequency

Multiple regression analysis similar to that reported by Kraszewski and Kulinski [34] and described previously has been used to correlate the weight of water and the weight of dry matter to the dielectric parameters of four sorghum hybrids at 5 MHz. The experimentally determined values of ε' fitted the following regression equation with a coefficient of determination of 0.90, where W_w and W_d are the weight of water and weight of dry matter in kg, occupying a volume of $5.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, respectively.

$$\varepsilon'_{5\text{MHz}} = 67.49474 W_w + 3.11660 W_d - 0.52528 \quad (23)$$

It has been shown in the previous section that the natural logarithm of the loss factor was a better indicator of the mass of water than the unmodified value ε'' . Regression analysis of data relating ε'' , W_w and W_d yielded a plane equation with a correlation coefficient of 0.77 (Eq. 24), while the equation relating $\ln(\varepsilon'')$ with W_w and W_d yielded a correlation coefficient of 0.90 (Eq. 25).

$$\varepsilon''_{5\text{MHz}} = 20.61556 W_w - 2.96933 W_d + 0.06691 \quad (24)$$

$$\ln(\varepsilon'')_{5\text{MHz}} = 41.89063 W_w - 5.37153 W_d - 1.99822 \quad (25)$$

Instead of solving Eqs. (24) and (25) by separation of variables, the least squares approximation may be used. Hence, multiple regression analysis was performed to correlate weight of water and the total weight of the moist sample (W_t) directly to relative permittivity and $\ln(\varepsilon'')$ at 5 MHz and the following equations were obtained, with coefficients of determination of 0.91 and 0.70, respectively.

$$W_w = 0.009437 \varepsilon'_{5\text{MHz}} + 0.006434 \ln(\varepsilon'')_{5\text{MHz}} + 0.026041 \quad (26)$$

$$W_t = 0.066531 \varepsilon'_{5\text{MHz}} - 0.088777 \ln(\varepsilon'')_{5\text{MHz}} - 0.023760 \quad (27)$$

Substituting Eqs. (26) and (27) into Eq. (5), and using the definition of the *relative* moisture content ($M = 100m$), the following bulk density-independent equation results

$$M = \left[\frac{0.009437 \varepsilon'_{5\text{MHz}} + 0.006434 \ln(\varepsilon'')_{5\text{MHz}} + 0.026041}{0.066531 \varepsilon'_{5\text{MHz}} - 0.088777 \ln(\varepsilon'')_{5\text{MHz}} - 0.023760} \right] 100 \quad (28)$$

3.3.3.3. Evaluation of the degree of suitability of the bulk density-independent dielectric models to estimate sorghum moisture content

Fig. 2 shows the statistical parameter values (R^2 , SEC, Δ_{max} , RMSE, η , ξ , δ , and χ^2) used to evaluate the density-independent dielectric models given by Eqs. (16), (21), (22) and (28), and the equation which includes bulk density as a dependent variable (Eq. 20) for the conditions studied.

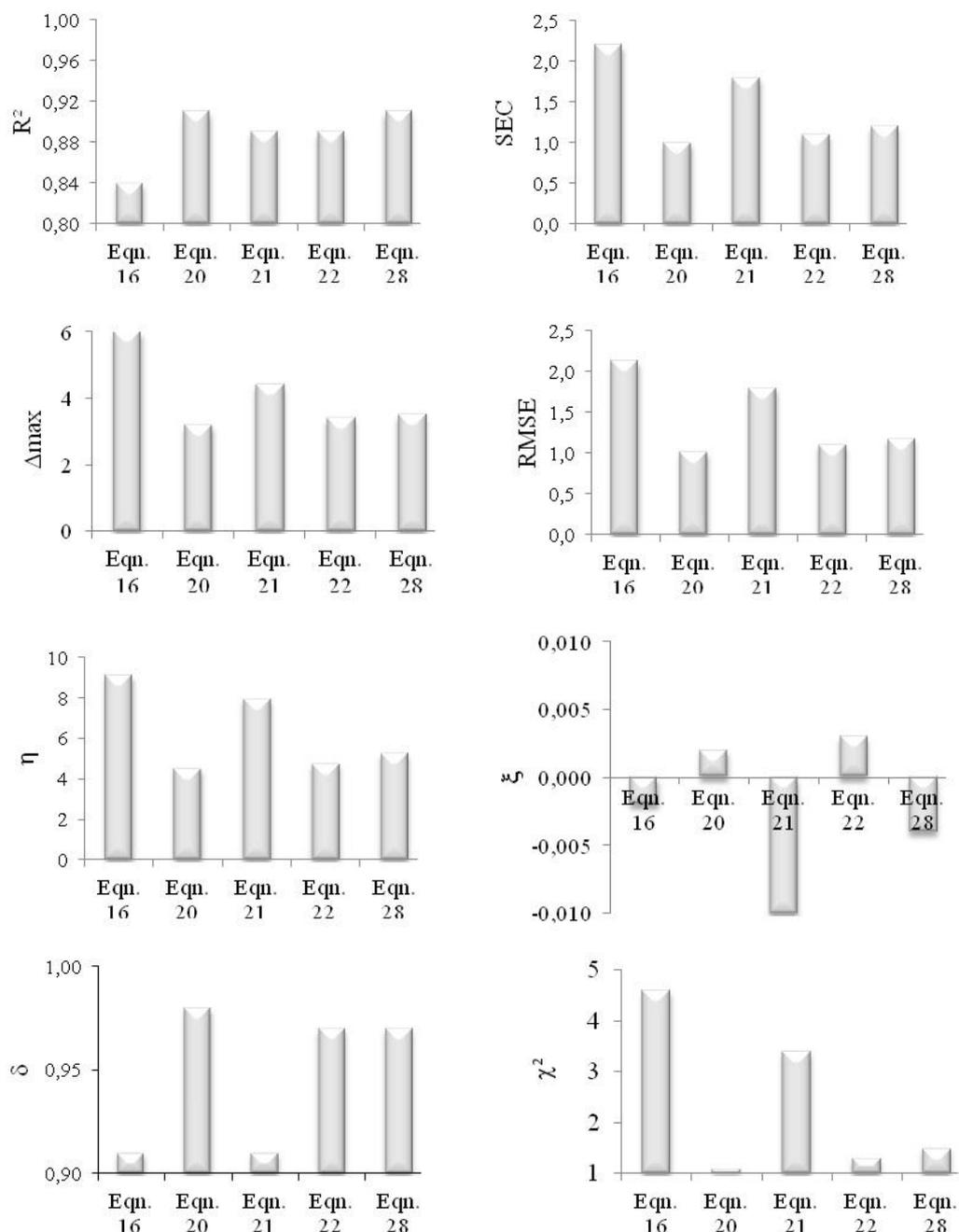


Fig 2. Values of error parameters (R^2 , SEC, Δ_{max} , RMSE, η , ξ , δ , and χ^2) used to investigate the goodness of fit of the four selected bulk density-independent equations and the equation which includes bulk density as a dependent variable, in the description of moisture content of four hybrids of sorghum (BRS 308, BRS 310, BRS 655, and CMSXS 769), at 22.5 ± 0.8 °C and $62.6 \pm 6\%$ relative humidity.

As far as measurement accuracy is concerned, the values presented in Fig. 2 must be compared against those values obtained using Eq. (20), which incorporates bulk density as a dependent variable. In practical terms, Eq. (20) should provide the best accuracy that could be expected through indirect moisture content measurement of sorghum for the conditions studied. Comparison of the error parameters indicates a similar performance between the model developed through the measurement of two dielectric parameters at two frequencies, Eq. (22), with the model which relates moisture content with two dielectric parameters measured at a single frequency, Eq. (28). In practical terms, the latter equation has the advantage of requiring an oscillator working at a single frequency in order to estimate the sample moisture content. The results illustrated in Fig. 2 also reveal that the direct correlation between moisture content and relative permittivity at two different frequencies, Eq. (16), performs poorly as a density-independent model.

The performance of Eqs. (22) and (28) in estimating moisture content is presented in Figs. 3 and 4 respectively. The straight lines in these figures represent ideal agreement between oven and predicted moisture contents. The errors displayed in Figs. 3 and 4 show that both equations overpredict moisture content at the lower portion of the moisture range, and underestimate it at its upper portion. Eqs. (22) and (28) were found to predict the measured moistures with standard errors of calibration (SEC) of 1.1. and 1.2 percentage points moisture, and absolute worst-case errors (Δ_{\max}) of 3.4 and 3.5 percentage points moisture, respectively. Data analysis revealed that the biggest discrepancies occurred around 23% moisture. So, an attempt was made to limit the moisture content range to 13% - 21% in the previous analysis, and a slight decrease in SEC values was noticed (0.9 – 1.0 percentage point moisture), and the worst-case error decreased to 2.2 percentage points moisture, which is still a disappointing figure for engineering purposes.

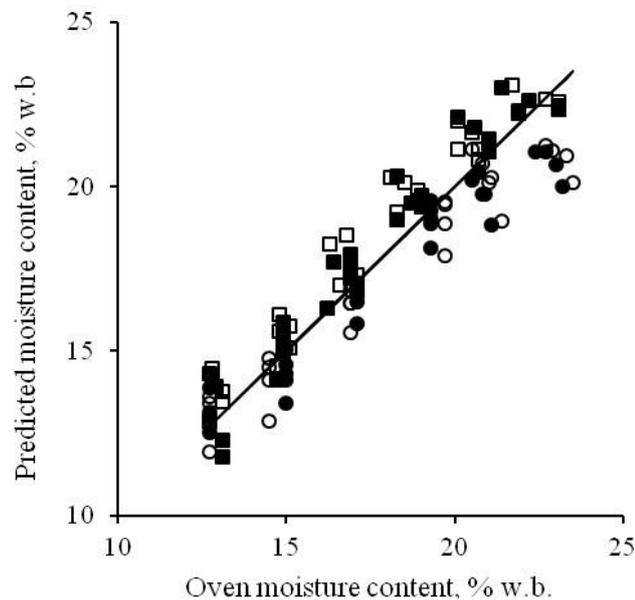


Fig. 3. Relationship between oven moisture content and predicted moisture content calculated from Eq. (22), at 22.5 ± 0.8 °C and $62.6 \pm 6\%$ relative humidity, for indicated hybrids of sorghum. ●, BRS 308; ○, BRS 310; ■, BRS 655; □, CMSXS 769.

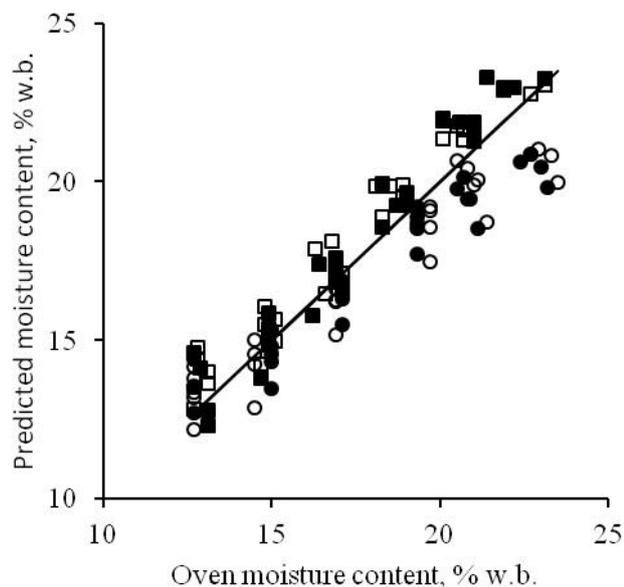


Fig. 4. Relationship between oven moisture content and predicted moisture content calculated from Eq. (28), at 22.5 ± 0.8 °C and $62.6 \pm 6\%$ relative humidity, for indicated hybrids of sorghum. ●, BRS 308; ○, BRS 310; ■, BRS 655; □, CMSXS 769.

For comparison purposes, the performance (SEC, Δ_{\max} , and ξ) of dielectric models published in literature are shown in Table 2. It is seen that smaller values of the standard error of calibration (SEC) and of the worst-case error (Δ_{\max}) were obtained for most products. Eqs (22) and (28) had bias values of 0.03 and -0.04 respectively, which compares well with the values presented in Table 2. Kim et al. [11] reported an RMSE of 0.4 while evaluating the performance of an RF impedance on-line moisture meter for use with rough rice, wheat, and barley. Digman et al. [9] used a planar microwave resonator to estimate maize and soybean moisture content and obtained a RMSE of 1.3. The best performance models derived in the present work for sorghum moisture content estimation produced RMSE values of 1.1 and 1.2. In order to fully characterise the best performance models, the present work evaluated error parameters (mean absolute percentage error η , fit index δ , and reduced chi-squared χ^2), which are not commonly used to assess the effectiveness of dielectric models, but which have broad acceptance in mathematical modelling evaluation in general. Even so, in this work, these less used error parameters confirmed that the best prediction dielectric models were indeed Eqs. (22) and (28). However, considering the principle of parsimony, the model based on Kraszewski and Kulinski's [34] assumptions, i.e., Eq. (28), was chosen as the best model to estimate sorghum moisture content from its dielectric properties for ϵ' and ϵ'' have to be measured at a single frequency.

Table 2

Performance (SEC, Δ_{\max} , and ξ) of dielectric models published in literature for non-destructive, instantaneous and density-independent estimation of moisture content of agricultural grain crops, oilseeds and parchment coffee.

Material	Moisture content range (% w.b.)	Frequency	SEC	Worst case error (Δ_{\max})	Bias (ξ)	Ref.
Common bean	11.5–15.5	2 and 5 MHz	0.50	1.0	–	[12]
	16.7–20.6	85 and 100 kHz	0.50	0.9	–	[12]
Coffee	11.0–14.0	1 MHz	0.30	0.5	–	[15]
	16.0–23.0	100 kHz	1.20	2.6	–	[15]
Maize	10.7–20.1	7 GHz	0.97	1.2	–	[23]
	8.0–26.0	1 to 140 MHz	0.37	2.5	–0.02	[10]
Rice	13.0–19.0	1 to 140 MHz	0.39	1.0	–	[10]
	12.0–26.0	10.5 GHz	0.44	1.5	0.07	[7]
Soybean	9.6–18.7	7 GHz	0.40	1.0	–	[23]
	8.0–16.0	1 to 140 MHz	0.18	–	0.01	[10]
Wheat	10.2–18.0	7 GHz	0.64	1.0	–	[23]
	10.0–19.0	16.8 GHz	0.50	1.2	0.01	[6]
	11.0–19.0	1 MHz	0.30	0.7	–	[22]
53 grain types	4.0–50.0	149 MHz	0.34	2.5	–	[14]

Even if the previous results reveal that further work might be necessary to improve the accuracy of the prediction equations, a dielectric model can only be considered satisfactory if the residues obtained are solely due to random errors of measurement of the variables involved. According to Byler et al. [50], if any functional relationship is observed between residues and estimated values of a model, it can be inferred that the model is inappropriate, indicating that the

parameters employed in its development are insufficient to explain the variation of experimental data.

The dispersion of the residues as a function of predicted moisture values, calculated by Eq. (22), is shown in Fig. 5. In all cases the residues are randomly above and below zero, denoting that there are no functional relationships between the residues and predicted moistures. This result indicates that there was no interference by non-defined variables in the measured values of moisture content. A similar scattering pattern was observed with Eq. (28), revealing the adequacy of both equations in predicting sorghum moisture content.

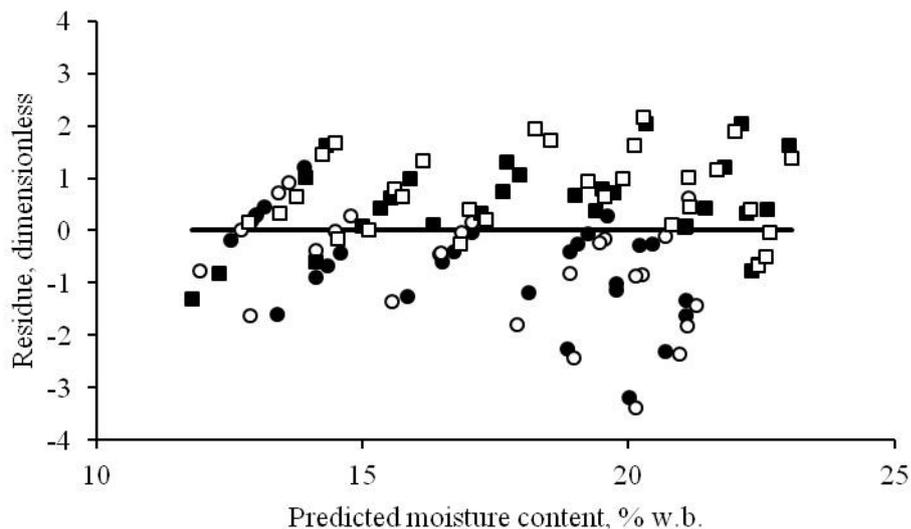


Fig. 5. Plot of residuals as a function of moisture content predicted by Eq. (22) for indicated hybrids of sorghum. ●, BRS 308; ○, BRS 310; ■, BRS 655; □, CMSXS 769.

3.3.4. CONCLUSIONS

A series of simultaneous measurements of capacitance and conductance at 5 MHz made on four sorghum hybrids (BRS 308, BRS 310, BRS 655, and CMSXS 769) varying in moisture content from 13 – 23%, and in bulk density from 575 – 818 kg m⁻³, revealed that the model based on Kraszewski and Kulinski's [34] assumptions was the most promising of the three dielectric models (ϵ' and ϵ'') investigated in the present work. The best model for sorghum density-independent

moisture estimation yielded the highest value for the coefficient of multiple determination ($R^2 = 0.91$), a low value for the standard error of calibration (SEC = 1.2), a disappointing absolute worst-case error (Δ_{\max}) of 3.5 percentage points moisture, a low value for the root mean squared error (RMSE = 1.2), an acceptable value for the mean absolute percentage error ($\eta = 5.3$), a small average bias ($\xi = -0.004$), a fit index close to unity ($\delta = 0.97$), and a low value for the reduced chi-squared ($\chi^2 = 1.5$). Besides the satisfactory values obtained for the main error parameters, Eq. [28] was mainly chosen as the most appropriate model by considering the principle of parsimony which may have to be accounted for in the design of a commercial moisture meter. The plot of residuals as a function of estimated moisture content revealed no deviation from a random pattern indicating that the parameters employed in the development of Eq. (28) are sufficient to explain the variation of the experimental data.

3.3.5. ACKNOWLEDGMENTS

This research work has been sponsored by the Rio de Janeiro State Research Foundation FAPERJ (E-26/103.134), the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development CNPq (472408/2011-9), Minas Gerais State Research Foundation FAPEMIG (CAG-1284), and the International Foundation for Science IFS (E/2622). Thanks are due to Mr. José Avelino Santos Rodrigues of the Maize & Sorghum Research Centre of the Brazilian Agricultural Research Corporation, EMBRAPA, who provided seed lots of the four sorghum hybrids used in this experiment.

3.3.6. REFERENCES

- [1] J. Thibault, C. Duchesne, Evaluation of simple control strategies for rotary dryers, *Drying Technol.* 22 (5) (Oct. 2004) 947–962.
- [2] J. Austin, S. Rodriguez, P. Sung, M. Harris, Utilizing microwaves for the determination of moisture content independent of density, *Powder*

Technol. (2012) In Press.

- [3] S.O. Nelson, RF sensing of grain and seed moisture content, *IEEE Sens. J.* 1 (2) (Aug. 2001) 119–126.
- [4] A.W. Kraszewski, Microwave aquametry: Introduction to the Workshop, in: A.W. Kraszewski (Ed.), *Microwave aquametry: Electromagnetic Wave Interaction with Water-Containing Materials*, IEEE Press, New York, 1996; pp. 3–34.
- [5] W. Meyer, W. Schilz, A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 13 (10) (Oct. 1980) 1823–1830.
- [6] A.W. Kraszewski, S. Trabelsi, S.O. Nelson, Moisture content determination in grain by measuring microwave parameters, *Meas. Sci. Technol.* 8 (8) (Aug. 1997) 857–863.
- [7] K.B. Kim, J.H. Kim, S.S. Lee, S.H. Noh, Measurement of grain moisture content using microwave attenuation at 10.5 GHz and moisture density, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 51 (1) (Feb. 2002) 72–77
- [8] S. Trabelsi, S.O. Nelson, M.A. Lewis, Microwave nondestructive sensing of moisture content in shelled peanuts independent of bulk density and with temperature compensation, *Sens. & Instrumen. Food Qual.* 3 (2) (Jun. 2009) 114–121.
- [9] M.F. Digman, S.P. Conley, J.G. Lauer, Evaluation of a microwave resonator for predicting grain moisture independent of bulk density, *Applied Engineering in Agriculture* 28 (4) (Jul. 2012) 611–617.
- [10] K.C. Lawrence, D.B. Funk, W.R. Windham, Dielectric moisture sensor for cereal grains and soybeans, *Trans. ASAE* 44 (6) (Nov. – Dec. 2001) 1691–1696.

- [11] K.B. Kim, J.W. Lee, S.S. Lee, S.H. Noh, M.S. Kim, On-line measurement of grain moisture content using RF impedance, *Trans. ASAE* 46 (3) (May – Jun. 2003) 861–867.
- [12] P.A. Berbert, M.A.B. Molina, A.P. Viana, V.O. Carlesso, M.T.R. Oliveira, Meyer and Schilz function to estimate common bean seed water content evaluated by radiofrequency, *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 64 (6) (Nov. – Dec. 2007) 569–574.
- [13] C.V.K. Kandala, C.L. Butts, Performance comparison of RF impedance and DC-conductance measurements for single peanut kernel moisture determination, *Trans. ASABE* 50 (1) (Jan. – Feb. 2007) 117–122.
- [14] D.B. Funk, Z. Gillay, P. Meszaros, Unified moisture algorithm for improved RF dielectric grain moisture measurement, *Meas. Sci. Technol.* 18 (4) (Apr. 2007) 1004–1015.
- [15] P.A. Berbert, M.A.B. Molina, V.O. Carlesso, M.T.R. Oliveira, Utilização de função dielétrica para estimar o teor de água de sementes de café [Use of a dielectric function for determination of coffee seeds moisture content], *Bragantia* 67 (2) (Apr. – Jun. 2008) 541–548.
- [16] P.A. Berbert, B.C. Stenning, On-line moisture content measurement of wheat, *J. Agric. Eng. Res.* 65 (4) (Dec. 1996) 287–296.
- [17] S.O. Nelson, RF and microwave dielectric properties of shelled, yellow-dent field corn, *Trans. ASAE* 22 (6) (1979) 1451–1457.
- [18] K. Sacilik, A. Colak, Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz, *Powder Technol.* 203 (2) (Nov. 2010) 365–370.
- [19] S.H. Noh, S.O. Nelson, Dielectric-properties of rice at frequencies from 50 Hz to 12 GHz, *Trans. ASAE* 32 (3) (May – Jun. 1989) 991–998.
- [20] A. Prasad, P.N. Singh, A new approach to predicting the complex

- permittivity of rice, *Trans. ASABE* 50 (2) (Mar. – Apr. 2007) 573–582.
- [21] S.O. Nelson, L.E. Stetson, Frequency and moisture dependence of dielectric properties of hard red winter-wheat, *J. Agric. Eng. Res.* 21 (2) (1976) 181–192.
- [22] P.A. Berbert, B.C. Stenning, Analysis of density-independent equations for determination of moisture content of wheat in the radiofrequency range, *J. Agric. Eng. Res.* 65 (4) (Dec. 1996) 275–286.
- [23] S.Trabelsi, S.O. Nelson, Nondestructive sensing of physical properties of granular materials by microwave permittivity measurement, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 55 (3) (Jun. 2006) 953–963.
- [24] K. Sacilik, C. Tarimci, A. Colak, Dielectric properties of flaxseeds as affected by moisture content and bulk density in the radio frequency range, *Biosystems Engineering* 93 (2) (Feb. 2006) 153–160.
- [25] D. Boldor, T.H. Sanders, J. Simunovic, Dielectric properties of in-shell and shelled peanuts at microwave frequencies, *Trans. ASAE* 47 (4) (Jul. – Aug. 2004) 1159–1169.
- [26] P.A. Berbert, D.M. Queiroz, E.C. Melo, Dielectric properties of common bean, *Biosystems Engineering* 83 (4) (Dec. 2002) 449–462.
- [27] P.A. Berbert, D.M. Queiroz, E.F. Sousa, M.B. Molina, E.C. Melo, Dielectric properties of parchment coffee, *J. Agric. Eng. Res.* 80 (1) (Sept. 2001) 65–80.
- [28] A. Chala, A.M. Tronsmo, M.B. Brurberg, Genetic differentiation and gene flow in *Colletotrichum sublineolum* in Ethiopia, the centre of origin and diversity of sorghum, as revealed by AFLP analysis, *Plant Pathol.* 60 (3) (Jun. 2011) 474–482.
- [29] E. Pennisi, How sorghum withstands heat and drought, *Science* 323

- (5914) (Jan. 2009) 573.
- [30] M.L. Wang, C. Zhu, N.A. Barkley, Z. Chen, J.E. Erpelding, S.C. Murray, M.R. Tuinstra, T. Tesso, G.A. Pederson, J. Yu, Genetic diversity and population structure analysis of accessions in the US historic sweet sorghum collection, *Theor. Appl. Genet.* 120 (1) (Dec. 2009) 13–23.
- [31] Sorghum production and harvested area may be found at <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>
- [32] T. Sasaki, B.A. Antonio, Plant genomics: Sorghum in sequence, *Nature* 457 (7229) (Jan. 2009) 547–548.
- [33] M.B. Whitfield, M.S. Chinn, M.W. Veal, Processing of materials derived from sweet sorghum for biobased products, *Ind. Crops Prod.* 37 (1) (May 2012) 362–375.
- [34] A. Kraszewski, S. Kulinski, An improved microwave method of moisture content measurement and control, *IEEE Trans. Ind. Electron. Control Instrum.* 23 (4) (1976) 364–370.
- [35] N.J.B. McFarlane, Two-frequency capacitance measurement of the moisture content of grain, Div. Note DN 1434, AFRC Institute of Engineering Research, Silsoe, 1987, pp. 1–12.
- [36] K.C. Lawrence, S.O. Nelson, Radio-frequency density-independent moisture determination in wheat, *Trans. ASAE* 36 (2) (1993) 477–483.
- [37] International Seed Testing Association ISTA, Determination of moisture content, in: *International Rules for Seed Testing* ISTA, Bassersdorf, 2010, 9-1–9-20.
- [38] J. D. Griffin, R.E. Skochdopole, Plastic foams, in: E. Baer (Ed.), *Engineering design for plastics*, Reinhold Publishing Corporation, Polymer Science and Engineering Series, New York, 1964, pp. 995-

1071.

- [39] V.V. Dzhemella, V.G. Pustynnikov, Two-parameter instrument for automatic measurement of moisture content in corn, *Instrum. Constr. (USSR)* 7 (1965) 32–34.
- [40] L.E. Stetson, S.O. Nelson, Audiofrequency dielectric properties of grain and seed, *Trans. ASAE* 15 (1) (1972) 180–184.
- [41] S.O. Nelson, Use of electrical properties for grain-moisture measurement, *J. Microwave Power* 12 (1) (1977) 67–72.
- [42] A.W. Kraszewski, S.O. Nelson, Density-independent moisture determination in wheat by microwave measurement, *Trans. ASAE* 34 (4) (Jul. – Aug. 1991) 1776–1783.
- [43] R.M. Lark, Some tools for parsimonious modelling and interpretation of within-field variation of soil and crop systems, *Soil Tillage Res.* 58 (3-4) (Mar. 2001) 99–111.
- [44] Statistica™ software v. 8.0, Statsoft, 2008.
- [45] V. Míka, J. Pozdíšek, P. Tillmann,; P. Nerušil, K. Buchgraber, L. Gruber, Development of NIR calibration valid for two different grass sample collections, *Czech J. Anim. Sci.* 48 (10) (Oct. 2003) 419–424.
- [46] T. Gunhan, V. Demir, E. Hancioglu, A. Hepbasli, Mathematical modelling of drying of bay leaves, *Energy Convers. Manage.* 46 (11-12) (Jul. 2005) 1667–1679.
- [47] M. Mundada, B.S. Hathan, S. Maske, Convective dehydration kinetics of osmotically pretreated pomegranate arils, *Biosystems Engineering* 107 (4) (Dec. 2010) 307–316.
- [48] C.J. Willmott, Some comments on the evaluation of model performance, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 63 (11) (1982) 1309–1313.

4. RESUMO E CONCLUSÕES

O interesse na utilização das propriedades dielétricas de produtos agrícolas granulares tem aumentado devido ao seu potencial para aplicação em novas tecnologias, como a medição contínua do teor de água em operações que utilizam controle automático de processos, como a colheita, secagem e aeração. O procedimento mais eficaz para diminuir os erros que alterações no fluxo de massa ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$) provocam na estimativa do teor de água dos grãos é a utilização de modelos dielétricos que empregam a permissividade elétrica relativa (ϵ') e o fator de perda dielétrica (ϵ'') do produto. Para o desenvolvimento e calibração de um protótipo para medição on-line do teor de água que seja abrangente é preciso derivar modelos dielétricos para diversos tipos de grãos. Esse procedimento já foi realizado para a maioria dos grãos de cereais, oleaginosas e, de forma limitada, para o café. Dentre os cereais mais importantes, em termos econômicos e de produção, o sorgo é o único que ainda não teve suas propriedades dielétricas estudadas.

Considerando a argumentação apresentada acima e refletindo como um trabalho futuro sobre a possibilidade de desenvolvimento de um protótipo para medição on-line do teor de água de grãos em movimento e que seja independente

do fluxo de massa, o presente trabalho foi realizado na expectativa de alcançar os seguintes objetivos:

1. Desenvolver um programa em LabVIEW para aumentar a eficiência na coleta e análise dos dados e que seja eficaz no controle, na configuração e na leitura dos valores medidos de capacitância e condutância de um sensor capacitivo contendo ou não as amostras de grãos. O programa deverá também efetuar o cálculo imediato de ε' e ε'' , permitindo a estimativa indireta do teor de água das amostras;

2. Investigar a variação das propriedades dielétricas dos grãos de sorgo em função da frequência (75 kHz a 5 MHz), do teor de água (7 a 23% b.u.) e da massa específica aparente, para quatro híbridos (BRS 308, BRS 310, BRS 655 e CMSXS 769), empregando-se um medidor de parâmetros de impedância HP 4285A; e

3. Avaliar o grau de adequação de três modelos dielétricos para estimativa acurada do teor de água dos grãos, tendo como fatores de comparação os seguintes parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação múltiplo (R^2), erro-padrão de calibração (EPC), erro máximo (Δ_{max}), raiz do erro quadrático médio (REQM), erro percentual absoluto médio (η), viés médio (ξ), índice de ajuste (δ) e chi-quadrado reduzido (χ^2). A escolha do melhor modelo estará ainda sujeita à análise de dispersão de resíduos e ao princípio da parcimônia.

O trabalho experimental necessário para a realização desses objetivos foi então dividido em três etapas, permitindo a elaboração de três artigos científicos, cada um descrevendo metodologias e resultados específicos. Os resumos e conclusões desses trabalhos encontram-se a seguir.

4.1. TRABALHO 1

Desenvolveu-se um aplicativo na linguagem de programação gráfica LabVIEW, que integrado a um medidor LCR de precisão, permitiu determinar 12 parâmetros de impedância de amostras de grãos inseridas em um sensor capacitivo no intervalo entre 75 kHz e 5 MHz. O programa desenvolvido em

LabVIEW mostrou-se eficaz no controle, na configuração e na leitura dos valores medidos de capacitância (C_p) e condutância (G) pelo medidor LCR. Além disso, o programa efetuou o cálculo imediato dos parâmetros dielétricos de interesse, ou seja, a permissividade elétrica relativa ϵ' e o fator de perda dielétrica ϵ'' . A partir dessas informações, o programa proposto efetuou, por meio de um modelo dielétrico específico, o cálculo do teor de água de amostras de sementes de quatro híbridos de sorgo, independentemente da massa específica aparente ρ , com erro padrão de calibração de 1,2 pontos percentuais de umidade.

4.2. TRABALHO 2

Neste trabalho procurou-se avaliar a variação das propriedades dielétricas de interesse, ϵ' e ϵ'' , em função da frequência, do teor de água e da massa específica aparente. Os resultados desse estudo permitiram antever os valores de frequência que poderiam ser mais adequados para o desenvolvimento de modelos dielétricos para estimativa on-line do teor de água dos grãos de sorgo. As medições das propriedades dielétricas revelaram que o valor de ϵ' , para qualquer valor de teor de água avaliado e para valores similares de ρ , diminui regularmente em função do aumento da frequência. A variação de ϵ'' em função da frequência foi menos regular que aquela de ϵ' , sendo definida por curvas parabólicas ora com concavidade voltada para cima ora para baixo, em gráfico semi-log, dependendo do teor de água. A permissividade elétrica relativa ϵ' aumentou com o aumento do teor de água para qualquer valor de frequência. Modelos cúbicos de regressão, com coeficientes de determinação próximos à unidade, foram os que melhor descreveram a variação de ϵ' em função do teor de água. As alterações nos valores de ϵ' e ϵ'' , em função de alterações no valor do teor de água, foram mais significativas para os menores valores de frequência. Uma possível região de dispersão dielétrica ocorreu no intervalo entre 13 e 15% b.u., indicando alterações nos mecanismos de adsorção de água. A variação de ϵ' e ϵ'' em função da massa específica aparente foi representada por modelos

lineares, com aumento da declividade em função do aumento do teor de água. O tipo de híbrido de sorgo e, conseqüentemente, o tamanho dos grãos, também teve efeito sobre as propriedades dielétricas. Grãos menores apresentaram menores valores de ε' e ε'' em relação aos híbridos que produzem grãos maiores.

O modelo dielétrico que correlaciona o teor de água de grãos de sorgo aos valores de ε' e $\ln(\varepsilon'')$, medidos a 5MHz, foi o que apresentou maior grau de acurácia, com $R^2 = 0,91$ e erro padrão de calibração de 1,2 pontos percentuais de umidade.

4.3. TRABALHO 3

Dos inúmeros modelos dielétricos existentes na literatura para estimar o teor de água de grãos em movimento e que não tenham influência da massa específica aparente, aqueles propostos por McFarlane (1987), por Kraszewski e Kulinski (1976) e por Lawrence e Nelson (1993) mostraram-se eficientes na determinação em linha do teor de água de grãos de trigo tanto em radiofrequências quanto em micro-ondas. Analisou-se, portanto, a eficácia desses três modelos dielétricos, a partir da avaliação dos parâmetros de erro e foi feita a escolha daquele que descrevia, com o maior grau de acurácia, o teor de água de grãos de sorgo de forma não destrutiva, em tempo real e independentemente da massa específica aparente, para condições semelhantes àsquelas estabelecidas no segundo trabalho. O modelo dielétrico proposto originalmente por Kraszewski e Kulinski (1976), que correlaciona o teor de água de grãos de sorgo aos valores de ε' e $\ln(\varepsilon'')$, medidos a 5 MHz, foi o que apresentou maior grau de acurácia, com $R^2 = 0,91$ e erro padrão de calibração de 1,2 pontos percentuais de umidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, C. J. B. (2009) *Arranjo de plantas de sorgo para a região do semiárido de Minas Gerais*. Tese (Doutorado em Agronomia) - Lavras -MG, Universidade Federal de Lavras - UFLA, 129p.
- Amoodeh, M. T., Khoshtaghaza, M. H., Minaei, S. (2006) Acoustic on-line grain moisture meter. *Computers and Electronics in Agriculture*, 52 (1):71-78.
- Austin, J., Rodriguez, S., Sung, P., Harris, M. (2012) Utilizing microwaves for the determination of moisture content independent. *Powder Technology*, In Press.
- Berbert, P. A. (1995) *On-Line density-independent moisture content measurement of hard winter wheat using the capacitance method*. Silsoe – Bedfordshire: PhD Thesis in Agricultural Engineering, 227p.
- Berbert, P. A., Molina, M. A. B., Carlesso, V. O., Oliveira, M. T. R. (2008) Utilização de função dielétrica para estimar o teor de água de sementes de café. *Bragantia*, 67 (2):541–548.
- Berbert, P. A., Molina, M. B., Viana, A. P., Carlesso, V. O., Oliveira, M. T. R. (2007) Meyer and Schilz function to estimate common bean seed water content evaluated by radiofrequency. *Scientia Agricola (Piracicaba, Brazil)*, 64 (6):569-574.
- Berbert, P. A., Queiroz, D. M., Melo, E. C. (2002) Dielectric properties of common bean. *Biosystems Engineering*, 83 (4):449-462.

- Berbert, P. A., Queiroz, D. M., Sousa, E. F., Detmann, E., Viana, A. P. E., Dionello, R. G. (2004) Adaptação da função dielétrica $\epsilon''/(\epsilon'(\text{af } \epsilon' - \epsilon''))$ para determinação do teor de água em sementes de feijão por radiofrequências. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental*, 8 (1):266-273.
- Berbert, P. A., Queiroz, D. M., Sousa, E. F., Molina, M. B., Melo, E. C. (2001) Dielectric properties of parchment coffee. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80 (1):65-80.
- Berbert, P. A., Stenning, B. C. (1996) Analysis of density-independent equations for determination of moisture content of wheat in the radiofrequency range. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 65 (4):275-286.
- Berbert, P. A., Stenning, B. C. (1996) On-line moisture content measurement of wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 65 (4):287-296.
- Berbert, P. A., Stenning, B. C. (1997) Influência do teor de umidade nas propriedades dielétricas de sementes de trigo no intervalo de 500 kHz a 5 MHz. *Engenharia Agrícola*, 16 (4):47-58.
- Berbert, P. A., Stenning, B. C. (1998b) Determinação do teor de umidade de sementes de trigo por meio da medição simultânea de dois parâmetros dielétricos em uma única frequência. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2 (3):329-334.
- Berbert, P. A., Stenning, B. C., Queiroz, D. M., Silva, J. S. (1998a) Construção e avaliação de um capacitor de cilindros concêntricos para determinação das propriedades dielétricas de grãos. *Engenharia Agrícola*, 18 (1):76-91.
- Berbert, P. A., Stenning, B. C., Silva, J. S., Queiroz, D. M., Melo, E. C. (1999) Derivação de uma equação para o cálculo do teor de umidade de sementes de trigo utilizando-se o fator de qualidade Q. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 3 (2):202-210.
- Boldor, D., Sanders, T. H., Simunovic, J. (2004) Dielectric properties of in-shell and shelled peanuts at microwave frequencies. *Transactions of the ASAE*, 47 (4):1159–1169.
- Bracke, W., Merken, P., Puers, R., Van Hoofa, C. (2005) *Design Methods and Algorithms for Configurable Capacitive Sensor Interfaces, Sensors and Actuators A* 125.
- Brasil. (2009) *Regras para análise de sementes*. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 399p.

- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., Hall, C. W. (1992) *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Byler, R. K., Anderson, C. R., Brook, R. C. (1987) Statistical methods in thin layer parboiled rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 30 (2):533–538.
- Callister, W. D. (2007) *Materials science and engineering: an introduction*. 7th edition, Wiley, New York, USA.
- Carvalho, N. M. (1994) *A secagem de sementes*. Jaboticabal: FUNEP / UNESP-FCAVJ. 165 p.
- Chala, A., Tronsmo, A. M., Brurberg, M. B. (2011) Genetic differentiation and gene flow in *Colletotrichum sublineolum* in Ethiopia, the centre of origin and diversity of sorghum, as revealed by AFLP analysis. *Plant Pathology*, 60 (3):474-482.
- Chang, C. S., Shackelford, L. E., Lai, F. S., Martin, C. R., Miller, B. S. (1981) Bulk properties of corn as affected by multiple-point grain spreaders. *Transactions of the ASABE*, 34 (4):1632-1636.
- Christensen, C. M., Kaufmann, H. H. (1969) *Grain storage the role of fungi in quality loss*. Univ. of Minnesota Press, Minneapolis, MN.
- Chuang, C. L., Ouyang, C. S., Lin, T. T., Yang, M. M., Yang, E. C., Huang, T. W., Kuei, C. F., Luke, A. J. J. A. (2011) Automatic X-ray quarantine scanner and pest infestation detector for agricultural products. *Computers and Electronics in Agriculture*, 77 (1):41-59.
- CONAB (2012) Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos 2011/2012 Setembro/2012. Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília.
- DeVoe, D. R., Brusewitz, G. H., Stone, M. L. (1985) Quantitative importance of bulk density when using dielectric measurements to predict percent moisture of hard red winter wheat. In Proceedings of the Summer Meeting of The American Association of Agricultural Engineers, East Lansing, USA, 85-3027.
- Digman, M. F., Conley, S. P., Lauer, J. G. (2012) Evaluation of a microwave resonator for predicting grain moisture independent of bulk density. *Applied Engineering in Agriculture*, 28 (4):611–617.
- Diniz, G. M. M. (2010) *Produção de sorgo (Sorghum bicolor L. Moench). Aspectos Gerais. Dissertação de Mestrado em Melhoramento Genético de Plantas - Recife - PE, Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, 123p.*

- Dufour, P. (2006) Control engineering in drying technology: Review and trends. *Drying Technology*, 24 (7):889-904.
- Dzhemella, V. V., Pustynnikov, V. G. (1965) Two-parameter instrument for automatic measurement of moisture content in corn. *Instrument Construction*, (USSR) 7:32-34.
- Ediger, R. J., Boelts, R. Grain Moisture Sensor, 1990. Disponível em: <<http://www.patentgenius.com/patent/4896795.html>>. Acesso em: 29 out. 2012.
- Embrapa (2010) Sistema de Produção 2 - Cultivo do Sorgo. Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas.
- FAO. 2012 Statistics Division FAOSTAT. Production: Crops Food and Agriculture Organization of The United Nations, 2012. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>>. Acesso em: 18 jun. 2012.
- Funk, D. B., Gillay, Z., Meszaros, P. (2007) Unified moisture algorithm for improved RF dielectric grain moisture measurement. *Measurement Science and Technology*, 18 (4):1004–1015.
- Griffin, J. D., Skochdopole, R. E. (1964) *Plastic foams*. In: BAER, E. Engineering design for plastics. New York: Reinhold Publishing Corporation, p. 995–1071.
- Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E., Hepbasli, A. (2005) Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46 (11-12):1667–1679.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2009) *Fundamentos de física*, 3, eletromagnetismo tradução de Fundamentals of physics. p. 111-130.
- Hasted, J. B. (1973) *Aqueous Dielectrics*. London: Chapman and Hall, 91–98.
- ISTA (2010) Determination of moisture content. In International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association. Bassersdorf, p. 9-1 – 9-20.
- Jafari, F., Khalid, K., Yusoff, W. M. D. W., Hassan, J. (2010) The analysis and design of multi-layer microstrip moisture sensor for rice grain. *Biosystems Engineering*, 106 (3):324-331.
- Johnson, G. W. (1997) *LabVIEW Graphical Programming: Practical Applications in Instrumentation and Control*. New York: McGraw-Hill.
- Kandala, C. V. K., Butts, C. L. (2007) Performance comparison of RF impedance and DC-conductance measurements for single peanut kernel moisture determination. *Transactions of the ASABE*, 50 (1):117–122.

- Kandala, C. V., Sundaram, J. (2010) Nondestructive measurement of moisture content using a parallel-plate capacitance sensor for grain and nuts. *IEEE Sensors Journal*, 10 (7):1282-1287.
- Kim, K. B., Kim, J. H., Lee, S. S., Noh, S. H. (2002) Measurement of grain moisture content using microwave attenuation at 10.5 GHz and moisture density. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51 (1).
- Kim, K. B., Lee, J. W., Lee, S. S., Noh, S. H., Kim, M. S. (2003) On-line measurement of grain moisture content using RF impedance. *Transactions of the ASABE*, 46 (3):861-867.
- King, R. J. (1995) On-Line moisture and density measurement of foods using microwave sensors. *Conference on Food Processing Automation*, Chicago. St. Joseph: ASAE, 4 (1):127-138.
- Kizito, F., S., C. C., Campbell, G. S., Cobos, D. R., Teare, B. L., Carter, B., Hopmans, J. W. (2008) Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 352 (3):367-378.
- Knöchel, R., Daschner, F., Taute, W. (2001) Resonant microwave sensors for instantaneous determination of moisture in foodstuffs. *Food Control*, 12 (7):447-458.
- Kraszewski, A. W. (1996) *Microwave Aquametry: Electromagnetic Wave Interaction with Water-Containing Materials*. New York: IEEE Press, 3–34 p.
- Kraszewski, A. W., Nelson, S. O. (1991) Density-independent moisture determination in wheat by microwave measurement. *Transactions of the ASAE*, 34 (4):1776–1783.
- Kraszewski, A. W., Nelson, S. O. (1994) Determination of Moisture Content and Bulk Density of Shelled Corn by Measurement of Microwave Parameters. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 58 (1):37-46.
- Kraszewski, A. W., Trabelsi, S., Nelson, S. O. (1997) Moisture content determination in grain by measuring microwave parameters. *Measurement Science and Technology*, 8 (8):857–863.
- Kraszewski, A. W., Trabelsi, S., Nelson, S. O. (1998) Comparison of density-independent expressions for moisture content determination in wheat at microwave frequencies. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71 (3):227-237.

- Kraszewski, A., Kulinski, S. (1976) An improved microwave method of moisture content measurement and control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, 23 (4):364-370.
- Kraus, J. D., Carver, K. R. (1973) *Electromagnetic*. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha Ltd.
- Kupfer, K. (1996) Possibilities and limitations of density-independent moisture measurement with microwaves. In: Kraszewski, A.W. (ed.). *Microwave aquametry - Electromagnetic wave interaction with water-containing materials*. New York: IEEE Press.
- Lagares, M. L. J. (2009) *Desenvolvimento de um Sistema Capacitivo para Medição de Umidade de Sementes Embarcado em uma Colhedora*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Uberlândia - MG, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 171p.
- Lark, R. M. (2001) Some tools for parsimonious modelling and interpretation of within-field variation of soil and crop systems. *Soil & Tillage Research*, 58 (3-4):99–111.
- Lawrence, K. C., Funk, D. B., Windham, W. R. (1999) Parallel-Plate moisture sensor for yellow-dent field corn. *Transactions of the ASABE*, 42 (5):1353-1357.
- Lawrence, K. C., Funk, D. B., Windham, W. R. (2001) Dielectric moisture sensor for cereal grains and soybeans. *Transactions of the ASABE*, 44 (6):1691–1696.
- Lawrence, K. C., Nelson, S. O. (1993) Radio-frequency density-independent moisture determination in wheat. *Transactions of the ASAE*, 36 (2):477-483.
- Li, Z., Vijaya-Raghavan, G. S., Wang, N., Garipey, Y. (2009) Realtime, volatile-detection-assisted control for microwave drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 69 (1):177–184.
- Liu, Q., Bakker-Arkema, F. W. (2001) Automatic control of crossflow grain dryers, Part 1: Development of a process model. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80 (1):81-86.
- Mathews, J. (1963) The Design of an Electrical Capacitance-type Moisture Meter for agricultural use. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 8 (1):17-30.
- McFarlane, N. J. B. (1987) *Two-frequency capacitance measurement of the moisture content of grain*. Silsoe: AFRC Institute of Engineering Research. 12p.

- McIntosh, R. B., Casada, M. E. (2008) Fringing field capacitance sensor for measuring the moisture content of agricultural commodities. *IEEE Sensors Journal*, 8 (3):240-247.
- Meyer, W., Schilz, W. (1980) A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 13 (10):1823-1830.
- Míka, V., Pozdíšek, J., Tillmann, P., Nerušil, P., Buchgraber, K., Gruber, L. (2003) Development of NIR calibration valid for two different grass sample collections. *Czech Journal of Animal Science*, 48 (10):419–424.
- Morissette, R., Savoie, P. (2008) Simulation of baled hay drying with airflow inversion and exhaust air recirculation. *Canadian Agricultural Engineering*, 50:3.9-3.19.
- Mundada, M., Hathan, B. S., Maske, S. (2010) Convective dehydration kinetics of osmotically pretreated pomegranate arils. *Biosystems Engineering*, 107 (4):307–316.
- Mwithiga, G., Sifuna, M. M. (2006) Effect of moisture content on the physical properties of three varieties of sorghum seeds. *Journal of Food Engineering*, 75 (4):480-486.
- Nelson, O. S., Stetson, L. E. (1976) Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of hard red winter wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 21 (2):181-192.
- Nelson, S. O. (1965) Dielectric properties of grain and seed on the 1 to 50-MC range. *Transactions of the ASABE*, 8 (1):38-48.
- Nelson, S. O. (1977) Use of electrical properties for grain-moisture measurement. *Journal of Microwave Power*, 12 (1):67–72.
- Nelson, S. O. (1979) RF and microwave dielectric properties of shelled, yellow-dent field corn. *Transactions of the ASAE*, 22 (6):1451-1457.
- Nelson, S. O. (1991) Dielectric properties of agricultural products. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 26 (5):845-869.
- Nelson, S. O. (1992) Measurement and application of dielectric properties of agricultural products. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 41 (1):7.

- Nelson, S. O. (2001) RF sensing of grain and seed moisture content. *IEEE Sensors Journal*, 1 (2):119–126.
- Nelson, S. O., Krazsewski, A. W., Trabelsi, S., Lawrence, K. C. (2000) Using cereal grain permittivity for sensing moisture content. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 49 (3):470-475.
- Nelson, S. O., Lawrence, K. C., Kandala, C. V. K. (1993) Parallel-Plate impedance sensing of moisture content in single seeds and grain kernels. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference - I2MTC*:56-58.
- Nelson, S. O., Stetson, L. E. (1976) Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of hard red winter wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 21 (2):181-192.
- Ni, J. Q., Heber, A. J. (2010) An onsite computer system for comprehensive agricultural air quality research. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71 (1):38-49.
- Noh, S. H., Nelson, S. O. (1989) Dielectric-properties of rice at frequencies from 50 Hz to 12 GHz. *Transactions of the ASAE*, 32 (3):991-998.
- Oliveira, R. P., França, A. F. S., Filho, O. R., Oliveira, E. R., Rosa, B., Soares, T. V., Mello, S. Q. S. (2005) Características agronômicas de cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) sob três doses de nitrogênio. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 35 (1):45-53.
- Panchariya, P. C., Popovic, D., Sharma, A. L. (2002) Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 52 (4):349–357.
- Parry, J. L. (1985) Mathematical-modelling and computer-simulation of heat and mass-transfer in agricultural grain drying - A review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32 (1):1-29.
- Pennisi, E. (2009) How sorghum withstands heat and drought. *Science*, 323 (5914):573.
- Pinho, R. G. V., Vasconcelos, R. C. (2002) *Cultura do sorgo*. Lavras: Editora UFLA.
- Prasad, A., Singh, P. N. (2007) A new approach to predicting the complex permittivity of rice. *Trans. ASABE*, 50 (2):573-582.

- Preethichandra, D. M. G., Shida, K. (2001) A simple interface circuit to measure very small capacitance changes in capacitive sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 50 (6):1583-1586.
- Rezende, G. M. (2010) *Características agronômicas e valor nutricional das silagens de cinco genótipos de sorgo cultivados no inverno*. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Janaúba - MG - Universidade Estadual de Montes Claros - Unimontes, 92p.
- Ricciotti, A. C. D. (2006) Utilização de wavelets no processamento de sinais emg. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Uberlândia - MG, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 116p.
- Rindler, V., Schwindke, P., Heschel, I., Rau, G. (1998) Technical description of a new low-temperature freeze-drying device. *International Journal of Refrigeration*, 21 (7):535-541.
- Sacilik, K., Colak, A. (2010) Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. *Powder Technol.*, 203 (2):365-370.
- Sacilik, K., Tarimci, C., Colak, A. (2006) Dielectric properties of flaxseeds as affected by moisture content and bulk density in the radio frequency range. *Biosystems Engineering*, 93 (2):153–160.
- Sacilik, K., Tarimci, C., Colak, A. (2007) Moisture content and bulk density dependence of dielectric properties of safflower seed in the radio frequency range. *Journal of Food Engineering*, 78 (4):1111-1116.
- Samer, M., Loebstin, C., von Bobrutzki, K., Fiedler, M., Ammona, C., Berg, W., Sanftleben, P. B. R. (2011) A computer program for monitoring and controlling ultrasonic anemometers for aerodynamic measurements in animal buildings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79 (1):1-12.
- Sasaki, T., Antonio, B. A. (2009) Plant genomics: Sorghum in sequence. *Nature*, 457 (7229):547-548.
- Satake, T. (1983) Cereal grain moisture content measuring apparatus. *INT CI*:7.
- Statsoft (2008) Statistica™ software v. 8.0.
- Stenning, B. C., Berbert, P. A. (1993) On line moisture content measurement. In *Cereal Quality III*, Cambridge, UK. 443-455.

- Stephens, L. E., Foster, G. H. (1978) Bulk properties of wheat and grain sorghum as affected by a mechanical grain spreader. *Transactions of the ASABE*, 15 (1):1217-1218, 1221.
- Stetson, L. E., Nelson, S. O. (1972) Audiofrequency dielectric properties of grain and seed. *Transactions of the ASAE*, 15 (1):180–184.
- Subramanian, S., Viswanathan, R. (2007) Bulk density and friction coefficients of selected minor millet grains and flours. *Journal of Food Engineering*, 81 (1):118-126.
- Thibault, J., Duchesne, C. (2004) Evaluation of simple control strategies for rotary dryers. *Drying Technology*, 22 (5):947–962.
- Trabelsi, S., Kraszewski, A. W., Nelson, S. O. (1999) Determining physical properties of grain by microwave permittivity measurements. *Transactions of the ASAE*, 42 (2):531-536.
- Trabelsi, S., Krazsewski, A. W., Nelson, S. O. (1998) New density-independent calibration function for microwave sensing of moisture content in particulate materials. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 47 (3):613-622.
- Trabelsi, S., Nelson, S. O. (2004) Temperature dependence of bound water dielectric behavior in grain. *Instrumentation and Measurement Technology Conference - IMTC*, 1 (1):66-69.
- Trabelsi, S., Nelson, S. O. (2006) S.Trabelsi, S.O. Nelson, Nondestructive sensing of physical properties of granular materials by microwave permittivity measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 55 (3):953–963.
- Trabelsi, S., Nelson, S. O., Lewis, M. A. (2009) Microwave nondestructive sensing of moisture content in shelled peanuts independent of bulk density and with temperature compensation. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 3 (2):114–121.
- Tsamis, E. D., Avaritsiotis, N. J. (2005) Design of planar capacitive type sensor for “water content” monitoring in a production line. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 118 (2):202-211.
- Wang, M. L., Zhu, C., Barkley, N. A., Chen, Z., Erpelding, J. E., Murray, S. C., Tuinstra, M. R., Tesso, T., Pederson, G. A., Yu, J. (2009) Genetic diversity and population structure analysis of accessions in the US historic sweet sorghum collection. *Theoretical and Applied Genetics*, 120 (1):13-23.

- Wells, L. K., Travis, J. (1996) *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Even Easier*. 586p.
- Whitfield, M. B., Chinn, M. S., Veal, M. W. (2012) Processing of materials derived from sweet sorghum for biobased products. *Industrial Crops and Products*, 37 (1):362–375.
- Whitley, K. N., Novick, L. R., Fisher, D. (2006) Evidence in favor of visual representation for the dataflow paradigm: An experiment testing LabVIEW's comprehensibility. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64 (4):281-303.
- Wilcke, W. F., Bern, C. J. (1986) Natural-Air corn drying with stirring: I. Physical properties effects. *Transactions of the ASABE*, 29 (3):854-859.
- Willmott, C. J. (1982) Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63 (11):1309–1313.
- Young, H. D., Freedman, R. A. (2009) *Física III: eletromagnetismo* tradução de Sear and Zemansky's University physics. São Paulo: Pearson Education do Brasil.