

**MODELOS DIELÉTRICOS PARA ESTIMAR O TEOR DE ÁGUA DE
SEMENTES DE SORGO E ARROZ**

KARINA DE JESUS SOARES

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2018**

MODELOS DIELÉTRICOS PARA ESTIMAR O TEOR DE ÁGUA DE SEMENTES DE SORGO E ARROZ

KARINA DE JESUS SOARES

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 Doutorado em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Pedro Amorim Berbert

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCH / UENF

037/2018

S676 Soares, Karina de Jesus.

Modelos dielétricos para estimar o teor de água de sementes de sorgo e arroz / Karina de Jesus Soares. – Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

137 f.

Bibliografia: f. 134 – 137.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2018.

Orientador: Pedro Amorim Berbert.

1. *Sorghum bicolor*. 2. *Oryza Sativa*. 3. Radiofrequência. 4. Propriedades Dielétricas. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD – 633.18

MODELOS DIELÉTRICOS PARA ESTIMAR O TEOR DE ÁGUA DE SEMENTES DE SORGO E ARROZ

KARINA DE JESUS SOARES

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 Doutorado em Produção Vegetal.

Aprovada em 22 de fevereiro de 2018.

Comissão Examinadora:

Prof. Elias Fernandes de Sousa, D.S., Engenharia Agrícola – UENF

Prof. Ricardo Ferreira Garcia, D.S., Engenharia Agrícola – UENF

Dr^a. Marcia Terezinha Ramos de Oliveira, D.S., Produção Vegetal (Externo)

Prof. Pedro Amorim Berbert, Ph.D, Engenharia Agrícola – UENF
Orientador

AGRADECIMENTOS

A CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado;

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias – CCTA e ao Laboratório de Engenharia Agrícola – LEAG, pela oportunidade de realização deste projeto;

Ao meu orientador, professor Pedro Amorim Berbert, pela oportunidade, exemplo de caráter e profissionalismo, confiança, paciência e por todos os ensinamentos, além do grande incentivo;

Ao meu orientador de “Iniciação Científica”, professor Elias Fernandes de Sousa, por acreditar no meu potencial e aguçar em mim o interesse pela ciência;

À Dr^a Marcia Terezinha Ramos de Oliveira por todo o suporte, amizade e incentivo;

Ao Prof. Eros Estevão de Moura pelo desenvolvimento do *software* que permitiu a coleta automática dos dados empregando o medidor LCR de precisão e pelo incentivo durante a realização do projeto;

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Arroz e Feijão pelo fornecimento das sementes de arroz e em especial a Marcia Gonzaga de Castro Oliveira e Ariane Gaspar Costa, ambas do Setor de Transferência de Tecnologia da Embrapa Arroz e Feijão, pelo envio dos lotes de sementes;

Às funcionárias da Coordenação de Pós-graduação em Produção Vegetal, Maria de Fátima dos Santos Sampaio e Patrícia Laurindo, pela atenção, paciência e colaboração;

Aos meus familiares, em especial aos meus pais Manoel José Garcias Soares e Mariléia Souza de Jesus Soares, responsáveis diretos por minha existência e minha educação, e aos meus irmãos Camila de Jesus Soares e Douglas de Jesus Soares, pelo afetuoso convívio. Aos pequenos Nicolas Soares Guinâncio e Victória de Jesus Soares por serem a luz do meu viver e fazerem com que meus dias sejam mais felizes e radiantes;

Aos colegas e professores do LEAG (Prof. Ricardo Garcia, Prof. José Carlos Mendonça, Prof. Paulo Marcelo, Antonione Araújo, Claudio Martins, Clinimar Amaral e Mario Sérgio), ao Prof. Henrique Duarte Vieira (LFIT) e ao José Arantes (LMGV) pelo convívio, suporte, conversas construtivas e ensinamentos;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS	vii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1. A cultura do sorgo	8
2.1.1. Classificação botânica e origem	8
2.1.2. Morfologia e fenologia da planta de sorgo	9
2.1.3. Uso Agrônômico e industrial	11
2.1.4. Híbridos de sorgo.....	13
2.1.4.1. Sorgo BRS 308.....	13
2.1.4.2. Sorgo BRS 310.....	13
2.1.4.3. Sorgo BRS 655.....	14
2.1.4.4. Sorgo CMSXS 769	14
2.2. Classificação botânica e origem do arroz	14
2.2.1. Morfologia e fenologia da planta de arroz	15
2.2.2. Características das sementes de arroz.....	17
2.2.3. Sistema de cultivo	19
2.2.4. Produção e composição centesimal.....	19
2.2.5. Cultivares de arroz	20
2.2.5.1. BRS Esmeralda	21
2.2.5.2. BRS GO Serra Dourada	21

2.2.5.3. BRS Sertaneja.....	21
2.2.5.4. BRS Tropical	22
2.2.6. Colheita de sementes e grãos de arroz	22
2.2.7. Pós-colheita (recepção, pré-limpeza, secagem, limpeza, classificação, beneficiamento e armazenamento) de sementes e grãos de arroz	23
2.2.7.1. Pré-limpeza	24
2.2.7.2. Secagem	24
2.2.7.3. Limpeza.....	29
2.2.7.4. Separação (grãos quebrados e descascados) e mesa densimétrica	30
2.2.7.5. Armazenamento	30
2.2.7.6. Beneficiamento.....	32
A. Grupos.....	33
B. Subgrupos	34
C. Classes.....	35
D. Tipos.....	35
2.2.8. Uso do arroz na alimentação e na indústria.....	36
2.3. Os princípios da capacitância e da condutância para determinação do teor de água de sementes e grãos: conceitos e definições	36
2.3.1. Capacitância	37
2.3.2. Condutância.....	38
2.3.3. Propriedades dielétricas.....	39
2.3.4. Propriedades dielétricas de produtos agrícolas	42
2.3.5. Fatores que afetam as propriedades dielétricas de grãos e sementes	44
2.3.5.1. Teor de água e frequência	44
2.3.5.2. Massa específica aparente.....	46
2.3.5.3. Temperatura	48
2.3.5.4. Cultivar	50
2.3.5.5. Composição química do material	51
2.3.6. Modelos dielétricos para estimativa do teor de água de grãos e sementes independente da massa específica aparente	52
2.3.6.1. Modelo de Kraszewski e Kulinski (1976)	52
2.3.6.2. Modelo de Meyer e Schilz (1980)	54
2.3.6.3. Modelo de Kent e Meyer (1982)	56
2.3.6.4. Modelo de McFarlane (1987)	57
2.3.6.5. Modelo de Powell et al. (1988)	58
2.3.6.6. Modelo de Lawrence e Nelson (1993).....	59
2.3.6.7. Modelo de Trabelsi et al. (1997b).....	60

2.3.6.8. Modelo de Zhang e Okamura (1999).....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
3. TRABALHOS	76
3.1. Trabalho 1	76
Berbert, P.A., Moura, E.E., Molina, M.A.B., Soares, K.J., Oliveira MTR. (2017) Density-independent radiofrequency dielectric models for moisture estimation in grain sorghum. <i>Journal of Food Measurement and Characterization</i> , 11(3):204- 212. ISSN 2193-4126. DOI 10.1007/s11694-016-9387-z.....	76
3.2. Trabalho 2	86
Predicting sorghum moisture content with radiofrequency dielectric functions..	86
3.3. Trabalho 3	108
Modelos dielétricos para estimar o teor de água de sementes de arroz em casca	108

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS

a_f	parâmetro do modelo de Trabelsi et al. (1997b)
d	distância entre os dois pontos em que a voltagem é aplicada, m
e	número de Euler ou base do logaritmo natural, $e = 2,71828182\dots$
F	frequência de oscilação do campo eletromagnético, Hz
f e F	Função
i	i -ésimo termo do somatório Σ
j	operador complexo, $j = \sqrt{-1}$
k	parâmetro do modelo de Trabelsi et al. (1997b)
ℓ	distância entre as placas de um capacitor ou espessura do dielétrico, m
n	número de variáveis independentes do modelo de calibração
P	constante do modelo de Powell et al. (1988)
u	teor de água, kg kg^{-1}
v	volume, m^3
A	área, m^2
BOD	<i>Biochemical Oxygen Demand</i>
BNC	em conector do tipo BNC (Bayonet Neill–Concelman)
C	capacitância, F
C_0	capacitância do capacitor vazio, pF

C_f	capacitância relacionada à deformação das linhas de campo nas bordas do capacitor e a capacitância devido a campos elétricos de circuitos próximos, pF
C_m	valor medido da capacitância do capacitor preenchido com a amostra, pF
D	fator de dissipação ou tangente do ângulo de perdas, adimensional
DC	em “ <i>DC bias</i> ” (<i>direct current</i>)
EPC	erro padrão de calibração, ponto percentual de teor de água
EPP	erro padrão de predição, ponto percentual de teor de água
F_r	dutos de exaustão de ar frio
G	condutância, S
G_a	condutância do capacitor vazio, μ S
G_m	condutância do capacitor preenchido com a amostra, mS
GPIO	<i>General Purpose Interface Bus</i>
I	corrente elétrica, A
I_C	corrente elétrica no capacitor de circuito paralelo equivalente de um dielétrico, A
I_R	corrente elétrica no resistor de circuito paralelo equivalente de um dielétrico, A
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
J	número de partículas por unidade de volume
K	função de Kent e Meyer (1982)
L	espessura da camada de material no modelo de Zhang e Okamura (1999)
LCR	medidor de indutância, capacitância e resistência
M_a	massa de água, kg
M_{ms}	massa de matéria seca, kg
MAP	máquina de ar e peneiras
MO	micro-onda (300 MHz a 300 GHz)
N	número de amostras usadas no cálculo dos parâmetros de erro
P	função de Powell et al. (1988), adimensional
PTFE	Politetrafluoroetileno
Q	carga elétrica, C
Q_{te}	dutos de entrada de ar quente
R	resistência, Ω

R^2	coeficiente de determinação múltiplo, adimensional
RF	radiofrequência (300 kHz e 300 MHz)
REQM	raiz do erro quadrático médio, ponto percentual de teor de água
S	resistividade, Ω m
T	Temperatura, $^{\circ}\text{C}$
U	teor de água, % b.u.
U_{est}	teor de água estimado por modelo dielétrico, % b.u.
U_{exp}	teor de água determinado experimentalmente pelo método padrão da estufa, % b.u.
V	voltagem, V
V_{ef}	voltagem efetiva, V
X_C	reatância capacitiva, Ω
Z	impedância, Ω
α	declividade da reta no modelo de Trabelsi et al. (1997b)
β	ponto em que a reta intercepta o eixo das ordenadas no modelo de Trabelsi et al. (1997b)
γ	radiação gama ou raio gama
δ	ângulo de perda, rad
ϵ	permissividade elétrica absoluta do dielétrico, pF m^{-1}
ϵ^*	permissividade elétrica complexa relativa do dielétrico, adimensional
ϵ_0	permissividade elétrica do vácuo = $8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
ϵ_{∞}	permissividade elétrica relativa obtida em frequência infinita, adimensional
ϵ_S	permissividade elétrica relativa obtida sob frequência zero, adimensional
ϵ'	permissividade elétrica relativa do dielétrico, adimensional
$\epsilon'_{\text{H}_2\text{O}}$	permissividade elétrica relativa da água, adimensional
ϵ'_{ms}	permissividade elétrica relativa da matéria seca dos grãos, adimensional
ϵ'_{PTFE}	permissividade elétrica relativa do teflon [®] (politetrafluoroetileno)
ϵ''	fator de perda dielétrica, adimensional
ζ	concentração volumétrica de água em material granular, kg m^{-3}
η	erro percentual absoluto médio, %
θ	ângulo de fase, rad

κ	coeficiente de atrito
λ	comprimento de uma onda de determinada frequência no vácuo, m
ξ	viés médio, ponto percentual de teor de água
ρ	massa específica aparente, kg m^{-3}
σ	condutividade, S m^{-1}
τ	tempo de relaxação, s
ω	frequência angular do campo elétrico, rad s^{-1}
Γ	função de Zhang e Okamura (1999)
Δ_{max}	erro absoluto máximo, ponto percentual de teor de água
Λ	função de Trabelsi et al. (1997b) simplificada
Σ	Somatório
$\Delta\Phi$	mudança de fase da micro-onda provocada pela redução de velocidade
Ψ	função de Trabelsi et al. (1997b)
χ^2	Teste de Qui-Quadrado, adimensional

RESUMO

SOARES, K. J. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Fevereiro de 2018. Modelos dielétricos para estimar o teor de água de sementes de sorgo e arroz. Professor Orientador: Pedro Amorim Berbert.

A automação de processos em instalações de pré-processamento de grãos e de beneficiamento de sementes requer a utilização de mecanismos de controle automático nas operações de secagem, armazenamento e aeração. Para que isso seja possível, é preciso desenvolver metodologias e equipamentos que permitam a determinação contínua, e em tempo real, do teor de água de grãos e sementes de cereais, oleaginosas, leguminosas e café em secadores e unidades armazenadoras de grande porte. Nesse sentido, o desenvolvimento de modelos dielétricos para se estimar o teor de água de produtos agrícolas granulares é, atualmente, uma das principais tendências da engenharia de desenvolvimento de protótipos de medidores *on-line*. Esses modelos baseiam-se na medição da permissividade elétrica relativa ϵ' e do fator de perda dielétrica ϵ'' , tanto em frequências de micro-ondas quanto em radiofrequências, de amostras de grãos que preenchem o espaço entre os eletrodos de um sensor capacitivo. Devido à elevada correlação entre a concentração volumétrica de água nas amostras e os respectivos valores de ϵ' e ϵ'' é possível desenvolver modelos dielétricos que sejam independentes da massa específica de amostras estáticas ou do fluxo de massa de grãos em movimento. Para projetar um sensor capacitivo que possa

integrar um medidor *on-line* do teor de água para fins agrícolas, e que seja o mais abrangente possível, é preciso, em primeiro lugar, determinar as propriedades dielétricas de diversos tipos de produtos. Dentre os produtos agrícolas granulares, os únicos que ainda não foram extensivamente estudados são o sorgo e o arroz. No caso do sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), as propriedades dielétricas já foram determinadas por Moura (2012), mas ainda não haviam sido utilizadas no desenvolvimento e avaliação abrangente de modelos dielétricos que sejam independentes da massa específica aparente ou do fluxo de massa. Sendo assim, utilizaram-se as propriedades dielétricas já conhecidas de quatro híbridos de sorgo (BRS 308, BRS 310, BRS 655 e CMSXS 769) para o desenvolvimento e avaliação de cinco modelos dielétricos. Em um primeiro estudo foram avaliados dois modelos que relacionavam o teor de água diretamente à função $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ ou a uma combinação dessa função com o $\ln(\epsilon'')$. Observou-se que o melhor modelo, para teores de água entre 11 e 21%[†], foi aquele que empregou a função $\{[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']_{1\text{MHz}} - [(\epsilon' - 1)/\epsilon'']_{5\text{MHz}}\}^2$ associada ao $\ln(\epsilon'')_{1\text{MHz}}$. Esse modelo permitiu a estimativa do teor de água de grãos de sorgo com erro padrão de calibração e predição de 0,8^{††} e com erro máximo de 1,8 tanto na calibração quanto na validação. Em uma segunda etapa, foram avaliados três modelos adicionais, também derivados da razão $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$. O melhor resultado foi aquele baseado na função $[(\epsilon' - 1)/\epsilon''] \cdot [(2\sqrt{\epsilon'})/(1 + \sqrt{\epsilon'})]_{100\text{kHz}}$, para teores de água entre 7 e 13%, e na mesma função, porém determinada a 1 MHz, em combinação com o $\ln(\epsilon'')_{1\text{MHz}}$, para teores de água entre 13 e 19%. Obtiveram-se erros padrão de calibração de 0,6 e 0,7 e erros padrão de predição de 0,6 e 0,8, para os diferentes intervalos de teor de água, respectivamente. O erro máximo foi de 1,3 na calibração e 2,0 na validação. Para as sementes de arroz em casca, primeiramente foi necessário determinar suas propriedades dielétricas no intervalo entre 75 kHz e 5 MHz. Isso foi feito medindo-se a capacitância e a condutância das amostras empregando-se medidor de parâmetros de impedância HP 4285A, em condições de laboratório a $22,5 \pm 1,7$ °C e $56 \pm 8\%$ de umidade relativa. Foram utilizadas sementes das cultivares BRS Esmeralda, BRS GO Serra Dourada, BRS Sertaneja e BRS Tropical, com teores de água entre 7 e 23% e massa específica aparente entre

[†] Os valores do teor de água serão expressos em % b.u. ao longo da tese.

^{††} Os valores dos erros padrão de calibração e de predição e do erro máximo serão expressos em “ponto percentual de umidade” ao longo da tese.

415 e 648 kg m⁻³. Avaliou-se, então, o grau de adequação de dez modelos dielétricos na estimativa do teor das amostras por meio do cálculo dos seguintes parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação múltiplo, erro padrão de calibração, erro padrão de predição, erro absoluto máximo, raiz do erro quadrático médio, erro percentual absoluto médio e viés médio. A escolha dos modelos mais apropriados foi feita adotando-se o Princípio da Parcimônia, que estabelece que os melhores modelos são aqueles obtidos utilizando-se estruturas aceitáveis e simples, contendo em sua formulação um menor número de parâmetros. O modelo que apresentou o melhor desempenho foi aquele que empregou a medição de $\varepsilon'_{500\text{kHz}}$ e do $\ln(\varepsilon''_{500\text{kHz}})$, com $R^2 = 0,9450$ e erros padrão de calibração e de predição de 1,1 e 1,3, respectivamente.

ABSTRACT

SOARES, Karina de Jesus; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. February, 2018. Dielectric models to estimate sorghum and rice moisture content. Advisor: Pedro Amorim Berbert.

Process automation in grain and seed processing plants requires the use of automatic control mechanisms in drying, storage and aeration systems. To this end, the development of methods and equipment capable of measuring the moisture content of grains and seeds of cereals, oilseeds, pulses and coffee, both in real time and on-line, in large capacity driers and storage units, must be addressed. One of the most promising trends in design, engineering and prototyping process of on-line moisture content meters is the development of density-independent dielectric models that are effective in the estimation of the moisture content of agricultural granular products. These models are based on measured values of the relative permittivity ϵ' and loss factor ϵ'' , at microwaves or radiofrequencies, of grain or seed samples occupying the free space between the electrodes of a capacitive sensor. Owing to the high correlation between water volumetric concentration in grain samples and the respective values of ϵ' and ϵ'' , it is possible to develop dielectric models to estimate grain moisture content that are independent of bulk density for static samples of grain, or independent of mass flow rate for moving grain. 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. However, among the most important cereal crops, both in economic and production terms, sorghum and rice have not yet had their dielectric properties thoroughly investigated. The dielectric properties of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) were determined by Moura (2012), but they haven't yet been comprehensively used to develop and assess dielectric models that are density- or mass flow rate-independent. Therefore, the already known dielectric properties of four grain sorghum hybrids, BRS 308, BRS 310, BRS 655 and CMSXS 769, were used here to develop and analyse the performance of five dielectric models for moisture estimation. As a first step, two models based on the function $[(\varepsilon' - 1)/\varepsilon'']$ or on its combination with $\ln(\varepsilon'')$ were assessed. Results revealed that the best-fit model, for moistures in the range from 11 to 21%[†], was based on the function $\{[(\varepsilon' - 1)/\varepsilon'']_{1\text{MHz}} - [(\varepsilon' - 1)/\varepsilon'']_{5\text{MHz}}\}^2$ associated with $\ln(\varepsilon'')_{1\text{MHz}}$. This model could estimate grain sorghum moisture content with a standard error of calibration and prediction of 0.8^{††}, and a worst-case error of 1.8, both for calibration and validation sets. The second step consisted of the analysis of three additional dielectric models, also derived from the function $[(\varepsilon' - 1)/\varepsilon'']$. However, the moisture range had to be divided into two intervals. Of the three dielectric models tested, the most satisfactory was the function $[(\varepsilon' - 1)/\varepsilon''] \cdot [(2\sqrt{\varepsilon'})/(1 + \sqrt{\varepsilon'})]_{100\text{kHz}}$, for moistures in the range from 7 to 13%. For moistures from 13 to 19%, the best-fit model was based on the same aforementioned function, but obtained at 1 MHz, in association with $\ln(\varepsilon'')_{1\text{MHz}}$. The corresponding calibration equation for the lower range of moistures, with $R^2 = 0.9226$, could estimate sorghum moisture with standard errors of calibration and prediction of 0.6, and maximum errors of 1.3 and 1.5, for calibration and validation sets, respectively. The best performance calibration model for the higher moisture range, with $R^2 = 0.8956$, produced the following error parameters: standard errors of calibration and prediction of 0.7 and 0.8, and worst-case errors of 1.5 and 2.0, for calibration and validation sets, respectively. In the case of rice seeds, the dielectric properties were measured and analysed before proceeding to model development and analysis. Values of ε' and ε'' were calculated from measured values of capacitance and conductance, from 75 kHz to 5 MHz, of a capacitive

[†] Values of moisture content will be expressed in % w.b. throughout the thesis, unless otherwise stated.

^{††} Values of standard errors of calibration and prediction, and maximum errors, will be expressed in percentage points moisture throughout the thesis.

sensor filled with rice samples. Measurements were made with an HP 4285A precision LCR meter, at laboratory conditions, 22.5 ± 1.7 °C and $56 \pm 8\%$ relative humidity, using samples of the following rice cultivars: BRS Esmeralda, BRS GO Serra Dourada, BRS Sertaneja and BRS Tropical. Moisture ranged from 7 to 23% and bulk densities varied from 415 to 648 kg m⁻³. Goodness of fit between experimental and predicted values of moisture content given by ten dielectric models was based on the following statistical parameters: coefficient of multiple determination, standard errors of calibration and prediction, worst-case error, root mean squared error, mean absolute percentage error, mean bias, and chi-squared. Residual plot analysis and the Principle of Parsimony were also considered in the selection of the most effective dielectric model. The best-fit model was represented by a calibration equation which related rice moisture content with the values of ε' and $\ln(\varepsilon'')$ measured at 0.5 MHz, producing standard errors of calibration and prediction of 1.1 and 1.3 percentage points moisture, respectively, with a coefficient of determination $R^2 = 0.9450$.

1. INTRODUÇÃO

Conhecer o teor de água de sementes e grãos é importante em diversas etapas da cadeia produtiva de alimentos, do plantio à colheita, nas operações de secagem e armazenamento e, posteriormente, no processamento industrial. A quantidade de água presente nos grãos é uma das principais informações utilizadas no ajuste e operação dos secadores, além de ser fator determinante na avaliação de sua susceptibilidade à deterioração durante o armazenamento. Ademais, as operações comerciais envolvendo grãos requerem a determinação acurada do seu teor de água.

A redução do consumo de energia e a concomitante obtenção de um produto com grau de umidade homogêneo ao final da secagem é um binômio que não pode deixar de ser considerado nas modernas unidades de pré-processamento de grãos. Para que esses propósitos sejam alcançados é preciso utilizar tecnologias como o controle automático de processos, o que, no caso de secadores de grande porte, requer a medição rápida, *on-line* e em tempo real do teor de água de produtos em movimento, sem a necessidade da retirada de amostras localizadas.

Os métodos tradicionais de medição do teor de água por gravimetria são demorados e não se adequam a essas exigências. Os equipamentos rotineiramente empregados em unidades de pré-processamento de grãos para a medição indireta, e mais rápida, do seu teor de água e que se baseiam na resistência elétrica ou na capacitância, também são difíceis de ser adaptados

para medições *on-line*. A maior dificuldade advém do efeito que variações na massa específica aparente (ρ) ou no fluxo de massa (\dot{m}) exercem sobre o valor medido de teor de água (u). A influência de ρ no cálculo do teor de água de uma amostra de grãos pode ser compreendida a partir da Eq. (1), que define o teor de água da amostra em decimal base úmida.

$$u = \frac{M_a}{M_a + M_{ms}} \quad (1)$$

Como o cálculo do teor de água está sempre associado a um determinado volume (v) da amostra, a Eq. (1) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$u = \frac{\frac{M_a}{v}}{\frac{M_a + M_{ms}}{v}} = \frac{\zeta}{\rho} \quad (2)$$

Sendo assim, se for possível estimar indiretamente a concentração volumétrica de água ζ , observa-se, na Eq. (2), que a determinação do teor de água requer o conhecimento prévio da massa específica ρ do produto. A medição do valor de ρ pode ser feita separadamente por meio da técnica de atenuação de raios- γ (Pires et al., 2009; Costa et al., 2013), porém, possivelmente devido aos altos custos envolvidos e à complexidade de implementação (Trabelsi et al., 2009), a utilização desse tipo de sensor ainda não foi avaliada em unidades de pré-processamento de grãos. Assim, a solução usualmente empregada, em situações *off-line*, consiste na utilização de amostras com massa constante tanto na calibração dos medidores elétricos quanto em sua posterior utilização em unidades comerciais e de pesquisa. De acordo com a Eq. (2), na determinação do teor de água de grãos, as alterações no valor da massa específica provocam efeitos similares aos provocados por alterações na concentração volumétrica de água. Um maior ou menor grau de compactação dos grãos no compartimento eletricamente ativo terá uma influência significativa no resultado final indicado pelo medidor. Portanto, o controle da massa específica do produto é uma

exigência comum a todos os métodos indiretos de determinação *off-line* do teor de água de grãos.

Mesmo com as dificuldades inerentes associadas ao método da capacitância, considera-se que o melhor procedimento para a estimativa *on-line* do teor de água de grãos ainda seja a utilização de métodos indiretos, principalmente os que empregam sensores capacitivos, desde que seja possível reduzir ou eliminar o efeito da massa específica aparente dos grãos. Nesses sensores, medem-se propriedades dielétricas das amostras que podem ser diretamente correlacionadas com seu teor de água.

A propriedade dielétrica que tem mostrado maior versatilidade para estimativa do teor de água de produtos granulares é a permissividade elétrica complexa relativa $\epsilon^* = \epsilon' - j \epsilon''$, cuja parte real ϵ' representa a permissividade elétrica relativa do dielétrico, a parte imaginária ϵ'' corresponde ao seu fator de perda dielétrica e $j = \sqrt{-1}$. Isso se deve ao fato de a permissividade elétrica relativa da água, no intervalo de radiofrequências, ser relativamente alta $\epsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 80$ em comparação com o valor baixo da permissividade elétrica relativa de grãos secos, que varia no intervalo $2 \leq \epsilon'_{\text{ms}} \leq 5$ (Kraus e Carver, 1973; Kaatze, 1996). Desta forma, pequenos incrementos da quantidade de água presente nos grãos resultam em um aumento considerável no valor de ϵ' . De acordo com Kraszewski (1988), as alterações que ocorrem em sinais elétricos que interagem com amostras úmidas de grãos (dielétricos) são proporcionais à concentração volumétrica de água, ζ , sendo praticamente independentes da massa de matéria seca do produto.

O estudo das relações funcionais entre ϵ' , ϵ'' e a quantidade de água presente nos grãos que ocupam um sensor capacitivo tem possibilitado o desenvolvimento de modelos dielétricos, $U = f(\epsilon', \epsilon'')$, que permitem estimar o teor de água desses produtos independente da massa específica aparente ρ (kg m^{-3}), no caso de amostras estáticas, ou do fluxo de massa \dot{m} ($\text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$), quando as amostras encontram-se em movimento.

Trabelsi et al. (2013) afirmam que para correlacionar as propriedades dielétricas de grãos ao seu teor de água é necessário analisar detalhadamente a variação de ϵ' e ϵ'' em função da frequência f de oscilação do campo elétrico, da massa específica aparente ρ e da concentração volumétrica de água ζ na amostra contida no interior de um 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. Assim, para determinar o teor de água *on-line* com precisão, os efeitos da massa específica aparente e da temperatura têm que ser explicados por meio de medição e compensação adicional ou eliminados por meio da identificação de funções que sejam independentes da massa específica aparente e que sejam insensíveis a variações de temperatura.

Grande parte dos pesquisadores que buscam soluções para redução do efeito da massa específica aparente na determinação *on-line* do teor de água de produtos agrícolas tem concentrado seus esforços no desenvolvimento de medidores operando em frequências de micro-ondas (Lisovsky, 2007; Trabelsi et al., 2009; Digman et al., 2012). Isso se deve, em parte, à redução ou eliminação dos problemas relacionados à condutividade iônica, o que permite estudar intervalo mais amplo de teor de água. No entanto, há também pesquisadores que demonstraram ser possível medir indiretamente o teor de água de grãos e sementes (geralmente até 23%), independente de variações na massa específica da amostra, empregando-se radiofrequências (Kim et al., 2003; Berbert et al., 2007a; Kandala e Butts, 2008; Funk et al., 2007; Moura et al., 2013). Nesses casos, com a escolha apropriada do tamanho e da forma dos eletrodos é possível medir o teor de água utilizando-se um volume considerável de grãos, resultando em leitura mais representativa. Outro fator relevante consiste no fato de o custo para o desenvolvimento e construção de aparelhos que utilizam circuitos operando em baixas frequências ser consideravelmente mais reduzido que aqueles operando em frequências de micro-ondas, tornando-os mais atraentes para fabricantes e usuários (Kraszewski e Nelson, 1991; Kim et al., 2003).

Para projetar um sensor capacitivo que possa integrar um medidor *on-line* do teor de água para fins agrícolas e que seja o mais abrangente possível é preciso, em primeiro lugar, determinar as propriedades dielétricas de diversos tipos de produtos. De fato, estudos sobre as propriedades dielétricas de grãos de cereais como arroz (Prasad e Singh, 2007), cevada (Kim et al., 2003), milho (Sacilik e Colak, 2010), sorgo (Moura et al., 2013), trigo (Berbert et al., 2002a) e de sementes de oleaginosas como amendoim (Boldor et al., 2004), linhaça (Sacilik et al., 2006), soja (Trabelsi e Nelson, 2006), de leguminosas como o feijão (Berbert et al., 2007a), café (Berbert et al., 2008) e de sementes de fruteiras

tropicais como mamão (Soares, 2014) têm sido realizados ao longo das últimas décadas, usando um amplo espectro de frequências.

As propriedades dielétricas de outros produtos agrícolas também têm sido objeto de investigação para estudar, além da determinação do teor de água, métodos de secagem empregando-se radiofrequências e micro-ondas, extração de óleos essenciais e avaliação de parâmetros qualitativos. Nesses casos, citam-se os trabalhos com macadâmia (Wang et al., 2013), *pellets* de casca de amendoim (Trabelsi et al., 2013), alecrim (Navarrete et al., 2011), alfafa (Shrestha et al., 2005), alho (Sharma e Prasad, 2002) e melão (Nelson et al., 2006).

Dentre os modelos dielétricos mais estudados, tanto os obtidos em radiofrequências como em micro-ondas, encontram-se aqueles propostos por Kraszewski e Kulinski (1976), Meyer e Schilz (1980), Kent e Meyer (1982), McFarlane (1987), Powell et al. (1988), Lawrence e Nelson (1993), Trabelsi et al. (1998a) e Zhang e Okamura (1999). Cada um desses modelos apresenta sua própria peculiaridade em termos de desempenho, podendo ser usados em circunstâncias específicas apropriadas (tipo de produto, intervalos de teor de água, massa específica aparente e frequência de oscilação do campo elétrico). Em geral, foi possível estimar-se o teor de água de sementes de trigo, feijão, café e sorgo, em radiofrequências, com erro padrão de calibração entre 0,3 e 0,7, erro padrão de predição entre 0,4 e 1,3 e erro máximo entre 1,0 e 2,6 (Berbert e Stenning, 1996; Berbert et al., 2004a, 2008; Moura et al., 2013). Trabelsi et al. (2009) também avaliaram a performance de alguns dos modelos dielétricos mencionados anteriormente na estimativa do teor de água de amendoim em casca e obtiveram erro padrão de calibração inferior a 1,0. De acordo com Chen (2003), o desvio padrão associado à medição do teor de água de grãos inteiros de arroz em casca pelo método padrão da estufa para o milho, 105 °C por 72 h (ASAE, 1982), variou entre 0,06% (a 15,0% b.u.) e 0,15% (a 32,5% b.u.). Para efeito comparativo, a diferença máxima permitida entre os teores de água de duas amostras (repetições) de um lote representativo de sementes, pelo método padrão da estufa, não deve exceder 0,2 ponto percentual de umidade (ISTA, 2010). A maioria dos autores considera que são aceitáveis, para fins de predição, modelos dielétricos capazes de estimar o teor de água dos grãos com erros no intervalo de $\pm 1,0$ ponto percentual de umidade (Nelson et al., 1992; Lawrence et al., 2001; Digman et al., 2012).

Dos principais cereais produzidos mundialmente, tanto em termos de valor econômico quanto de qualidade nutricional, os grãos de arroz e sorgo são aqueles cujas propriedades dielétricas ainda não foram amplamente empregadas na elaboração de modelos para determinação on-line do seu teor de água. No caso do sorgo, Moura et al. (2016) determinaram os efeitos da frequência, do teor de água e da massa específica aparente sobre as propriedades dielétricas de diversos híbridos. Além disso, explorou-se a adequação de três modelos dielétricos para estimativa do teor de água de grãos de sorgo com a redução do efeito da massa específica aparente (Moura et al., 2013).

Quanto ao arroz, Noh e Nelson (1989) determinaram as propriedades dielétricas em amplo espectro de frequências, 50 Hz a 12 GHz, porém empregou-se número limitado de cultivares (três) e o efeito da massa específica não foi extensivamente avaliado. Yagihara et al. (2007) empregaram a técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) para calcular a concentração volumétrica de água (g cm^{-3}) de grãos e farinha de arroz a partir de estudos de relaxação dielétrica no intervalo entre 100 Hz e 10 GHz. Jafari et al. (2010) desenvolveram um sensor de microfaixa em multicamadas, operando a 9 GHz, para determinar o teor de água de grãos de cinco cultivares de arroz no intervalo entre 10 e 30%. No entanto, o efeito da massa específica aparente foi avaliado apenas para dois tipos de amostra: compactada e não compactada. Kim et al. (2002) desenvolveram um modelo dielétrico, a 10,5 GHz, para estimar o teor de água de duas cultivares de arroz em casca e uma cultivar de arroz integral, porém, o modelo demandava a medição independente da massa da amostra.

Observa-se, portanto, que para o sorgo há a necessidade de se expandir o estudo sobre a avaliação de modelos dielétricos para estimativa do teor de água em radiofrequências, uma vez que apenas três, dos oito modelos prevalentes na literatura, foram testados (Moura et al., 2013). Para o arroz, seja em casca, integral ou polido, não foi encontrado na literatura nenhum estudo sobre o desenvolvimento de modelos dielétricos para a estimativa do seu teor de água em radiofrequências.

Sendo assim, de acordo com o exposto anteriormente, o trabalho foi dividido em duas etapas, sendo que na primeira delas o objetivo foi utilizar as propriedades dielétricas de quatro híbridos de sorgo (BRS 308, BRS 310, BRS 655 e CMSXS 769) obtidas por Moura (2012) para desenvolver e avaliar cinco

modelos dielétricos para estimativa do teor de água dos grãos, para frequências de 0,1, 1,0 e 5,0 MHz, teores de água entre 7 e 23% e massa específica aparente entre 570 e 820 kg m⁻³, em condições de laboratório. A segunda etapa consistiu em avaliar o grau de adequação de dez modelos dielétricos previamente avaliados na literatura para outros produtos agrícolas granulares, na estimativa do teor de água de sementes de arroz em casca das cultivares BRS Esmeralda, BRS GO Serra Dourada, BRS Sertaneja e BRS Tropical, para frequências entre 75 kHz e 5 MHz, teores de água entre 7 e 23% b.u, massa específica aparente variando entre 415 e 648 kg m⁻³, também em condições de laboratório.

A tese está organizada na forma de três artigos científicos: um deles publicado, outro submetido para publicação e um terceiro já elaborado, porém ainda não submetido. Desta forma, o primeiro artigo, que corresponde ao primeiro objetivo da tese, intitula-se *Density-independent radiofrequency dielectric models for moisture estimation in grain sorghum*, publicado no seguinte periódico da editora Springer: *Journal of Food Measurement and Characterization* 11(1): 204-212 (2017), ISSN 21-93-4126 e DOI 10.1007/s11694-016-9387-z.

O segundo artigo intitula-se *Predicting sorghum moisture content with radiofrequency dielectric functions* e foi escrito de acordo com as instruções para elaboração de manuscritos do periódico *Journal of the Science of Food and Agriculture* (Online ISSN: 1097-0010), publicado pela editora *Wiley Online Library*. Esse trabalho também se encontra no âmbito do primeiro objetivo da tese. As únicas alterações feitas na formatação desse artigo para sua inclusão na presente tese consistiram na inserção de figuras e tabelas no corpo do texto de forma a facilitar a leitura.

O terceiro trabalho, que atende ao segundo objetivo da tese, corresponde ao artigo científico intitulado “Modelos dielétricos para estimar o teor de água de sementes de arroz em casca”. O artigo também foi elaborado de acordo com as instruções dos autores do periódico *Journal of the Science of Food and Agriculture*.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura do sorgo

2.1.1. Classificação botânica e origem

Sorgo é um nome comum à espécie *Sorghum bicolor* (L.) Moench, pertencente à classe Liliopsida (monocotiledôneas), à ordem Cyperales, à família Poaceae (gramíneas) e ao gênero *Sorghum* Moench (USDA, 2016). Os sorgos cultivados atualmente se originaram da espécie silvestre *Sorghum bicolor* subsp *arundinaceum*. Trata-se de planta originária dos continentes africano e asiático e possui como centro de diversidade do gênero *Sorghum* o quadrante Centro-Oeste da África, na região da Etiópia e do Sudão (Magalhães et al., 2000), o que lhe confere rusticidade e adaptação do cultivo em regiões com alto índice de estresse hídrico.

Devido a sua ampla adaptação a áreas que apresentam déficit hídrico e sua tolerância a altas temperaturas, a cultura foi disseminada por todos os continentes, tendo, atualmente, destaque como maiores produtores os EUA que participam com cerca de 20% da produção mundial, seguidos da Nigéria (10,9%), México (7,8%) e Índia (6,9%) (FAO, 2018). O Brasil encontra-se entre os dez países em termos de volume produzido do grão, com produção de 1,2 milhão de toneladas, o que representa, aproximadamente, 1,8% do total mundial. A

produção brasileira se concentra, basicamente, nos estados de Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso, que juntos detêm 74,7% da produção nacional (FAO, 2018; IBGE, 2018).

2.1.2. Morfologia e fenologia da planta de sorgo

O sorgo é uma planta anual, monoica, autógama, com baixa taxa de fecundação cruzada, em torno de 5%, que ocorre, principalmente, pelo vento. A planta de sorgo (Figura 1) apresenta metabolismo C4, resposta fotoperiódica típica de dias curtos e de altas taxas fotossintéticas (Borém et al., 2014; Taiz et al., 2017). Os materiais genéticos comerciais requerem temperaturas superiores a 21 °C para um bom crescimento e desenvolvimento, são tolerantes ao déficit hídrico e suportam também o excesso de umidade no solo, assim podem ser produzidos em uma ampla gama de condições do solo (Perrier et al., 2017).

O sistema radicular de uma planta de sorgo pode ser dividido em primário, secundário e adventício. O sistema primário se desenvolve no processo de germinação e supre a plântula com água e nutrientes, são pouco ramificadas e morrem após o surgimento das raízes secundárias. As raízes secundárias se desenvolvem no primeiro nó, apresentam muitas ramificações que penetram no solo em todas as direções e forma o sistema radicular principal, este possui sílica na endoderme, grande quantidade de pelos absorventes e altos índices de lignificação de periciclo, essa anatomia especial confere à cultura maior tolerância à seca do que as demais (Albuquerque, 2009). O sistema radicular principal é fasciculado e se espalha podendo atingir um raio de 2,0 metros ao redor da planta, atingindo cerca de 1,5 m de profundidade, sendo mais denso nos primeiros 90 centímetros do solo. Já as raízes adventícias são originadas nos nós acima do solo e têm uma função de suporte, estas não configuram uma presença obrigatória na planta sendo geralmente associadas como uma falta de adaptação da cultura que pode ser devido à absorção ineficiente de água e nutrientes (Magalhães et al., 2000).

Possui caule do tipo colmo, de coloração verde na maioria das cultivares, flexível, geralmente de consistência herbácea, silicoso, com circunferência basal de 2 a 3 cm, constituídos por nós e entrenós, de onde emitem as gemas axilares e folhas ao longo de toda a planta (Almeida e Almeida, 2014; Borém et al., 2014).



Figura 1. Representação esquemática da planta de sorgo.
Fonte: Harper (2016).

Durante o ciclo, a planta do sorgo depende das folhas como principais órgãos fotossintéticos, e a taxa de crescimento da planta é diretamente influenciada pela taxa de expansão da área foliar e pela área fotossintética ativa. O número de folhas em uma planta varia de 7 a 30, sendo comumente encontradas de sete a 14 em genótipos adaptados de sorgo granífero. O comprimento da folha pode atingir aproximadamente 1 m e a largura, de 0,5 a 15 cm. Os fatores que determinam o número de folha do sorgo são: cultivar, fotoperíodo e temperatura (Magalhães et al., 2000; Borém et al., 2014).

A inflorescência de uma planta de sorgo é uma panícula de crescimento determinado que geralmente é compacta. A forma e a cor da panícula variam de acordo com o genótipo. O eixo primário da panícula é angular e os eixos secundários estão dispostos em espiral. O pedúnculo que sustenta a panícula geralmente é reto. O comprimento da panícula varia de 7,5 a 50 cm e a largura de 4 a 20 cm. Cada panícula contém entre 800 e 3.000 sementes, que são parcialmente cobertas pelas glumas. O fruto é do tipo cariopse e é conhecido por apresentar a semente soldada ao pericarpo em toda ou em parte de sua

extensão, essa característica é comum ao grupo dos cereais (Mejia e Lewis, 1999; Magalhães et al., 2000).

A semente é composta por três partes principais: a cobertura protetora, o eixo embrionário e o endosperma, que representam cerca de 8%, 10% e 80% da semente de sorgo madura, respectivamente. A cobertura consiste em um pericarpo externo ceroso que é fundido com a testa. O pericarpo central contém até 3,7% do teor total de amido. A testa está localizada diretamente sob o pericarpo e sua presença e pigmentação são determinadas geneticamente. Os polifenóis, quando presentes, são responsáveis pela pigmentação no pericarpo e na testa. O embrião contém o escutelo, o eixo embrionário, a plúmula e a radícula e é rico em proteínas estruturais, lipídios e minerais. A proteína na camada periférica do endosperma é gradualmente substituída por amido. No caso do sorgo, a maior quantidade de proteína está localizada no endosperma, onde ocorre uma quantidade muito limitada do aminoácido lisina. O embrião e o pericarpo têm um teor de lisina de três a quatro vezes superior ao do endosperma (Mejia e Lewis, 1999).

O crescimento da planta de sorgo divide-se em três fases ou estágios de crescimento (EC). Magalhães et al. (2000) os enumeram em: 1) EC1 – corresponde às etapas que vão da semente à iniciação da panícula, engloba a emergência, a formação da plântula e o perfilhamento. 2) EC2 – Tem início na formação da panícula e encerra com o início do florescimento. 3) EC3 – Compreende as fases de formação e enchimento de grãos ou sementes, até que atinjam a maturidade fisiológica.

2.1.3. Uso Agronômico e industrial

O sorgo apresenta ampla utilidade na dieta alimentar humana, de forma direta (farinha do grão) ou de forma indireta (na indústria de rações e volumosos, em pastoreios diretos ou no preparo de silagens para os animais). O sorgo é um componente importante no *mix* de insumos energéticos para a fabricação de rações para aves, suínos, bovinos e outros, sendo que este mercado tem preferência pelo uso de grãos sem taninos (Magalhães et al., 2000). É utilizado, também, como alternativa para o uso no sistema de integração lavoura-pecuária e

para a produção de massa verde, proporcionando maior proteção ao solo contra a erosão e maior quantidade de matéria orgânica disponível (Borém et al., 2014).

Os procedimentos adotados nas etapas de colheita e pós-colheita de grãos e/ou sementes de sorgo são semelhantes àqueles empregados na cultura do arroz. Esses procedimentos serão descritos com mais detalhes posteriormente. Todavia, para o sorgo, não são empregados métodos de beneficiamento como o brunimento e a classificação por grupos, subgrupos, classes e tipos. Ressalta-se que a colheita mecânica do sorgo granífero pode ser realizada quando o teor de água se situar entre 14% e 18% (Borém et al., 2014).

De acordo com o uso agrônômico, o sorgo pode ser classificado em: a) granífero ou de porte baixo; b) forrageiro ou de porte alto; c) dupla aptidão ou de porte médio; d) sacarino. Assim, define-se a finalidade de uso de acordo com os critérios morfoanatômicos exibidos pela espécie, como a arquitetura da planta, a proporção de colmo, folhas e panículas, o que se reflete na produção de matéria seca por hectare, na composição bromatológica e no valor nutritivo (Martins et al, 2003). Apresenta-se, a seguir, uma breve descrição de cada tipo de sorgo:

- a) Sorgo granífero: utilizado para a produção de grãos para a indústria de rações ou para o consumo. As cultivares de sorgo granífero são subdivididas em taninosas e não taninosas. Aquelas que possuem tanino nos grãos são indicadas principalmente para regiões que sofrem com o ataque de pássaros e apresentam umidade relativa elevada durante o período da colheita. A presença de tanino nos grãos é uma característica positiva para a produção agrícola da espécie, contudo, para a alimentação de animais monogástricos (aves e suínos), sua presença é indesejável, devido ao seu efeito negativo na digestão de proteínas por esse grupo de animais. Já para ruminantes, a presença de tanino no grão é minimizada pela ação dos microrganismos presentes no rúmen, embora algumas pesquisas recentes demonstrem variações na retenção de nitrogênio, na absorção de aminoácidos e no consumo de matéria seca pelos animais que se alimentam de sorgo com presença de tanino nos grãos (Borém et al., 2014);
- b) Forrageiro: destinado ao uso para silagem, o que é favorecido pelas suas características agrônômicas, como alta produção de forragem, maior tolerância à seca e ao calor, capacidade de explorar maior volume de solo, por

apresentar um sistema radicular abundante e profundo; destaca-se também pela possibilidade de se cultivar a rebrota, com produção que pode atingir até 60% no primeiro corte, quando submetido a manejo adequado (Magalhães et al., 2000);

- c) Dupla aptidão: pode ser usado para a produção de grãos ou de silagem;
- d) Sacarino: ao lado da cana-de-açúcar, que é tradicionalmente empregada na produção de etanol, o sorgo sacarino apresenta-se como uma ótima opção sob o ponto de vista agrônomo e industrial. O sorgo sacarino pode oferecer as seguintes vantagens: rapidez no ciclo (quatro meses); cultura totalmente mecanizável (plantio por sementes, colheita mecânica); cultivo na entressafra da cana, colmos suculentos com açúcares diretamente fermentáveis (produção de 40 a 60 t ha⁻¹); utilização do bagaço como fonte de energia para industrialização, cogeração de eletricidade, etanol de segunda geração ou forragem para animais, contribuindo para um balanço energético favorável.

2.1.4. Híbridos de sorgo

2.1.4.1. Sorgo BRS 308

BRS 308 é um híbrido simples, com boa resistência à antracnose, tolerante à helmintosporiose e ferrugem. Apresenta alto potencial de rendimento de grãos e adaptabilidade a ambientes desfavoráveis e favoráveis, elevado teor de proteína nos grãos, boa capacidade de rebrota e se apresenta como bom competidor em relação aos híbridos comerciais. O BRS 308, sem tanino nos grãos, apresenta porte baixo, ciclo médio e é recomendado para as regiões Sudeste e Centro-Oeste, em plantios de sucessão a culturas de verão (Santos et al., 2007).

2.1.4.2. Sorgo BRS 310

Cultivar de sorgo granífero do tipo híbrido simples, de porte baixo, sem tanino, de grãos vermelhos, com altura de \cong 1,15 m, ciclo de 120 dias e resistente ao acamamento. Apresenta resistência à cercosporiose e moderada resistência à

antracnose, à helmintosporiose e à ferrugem. Apresenta rendimento de grãos de 4 a 5 t ha⁻¹ (sucessão). Além disso, apresenta tolerância à toxicidade de alumínio do solo, boa capacidade de rebrota, resistência às espécies de nematoides *Meloidogyne incognita* raça 3 e *M. javanica* (Santos et al., 2004).

2.1.4.3. Sorgo BRS 655

Cultivar de sorgo forrageiro do tipo híbrido simples, recomendado para o fornecimento de forragem de alta qualidade, para ensilagem com alta digestibilidade e alto teor proteico (média de 8% de proteína bruta). Pela sua estabilidade de produção, alta resistência à estiagem, alta qualidade de forragem com baixo custo de produção e alto potencial de produção de massa verde (média de 50 t ha⁻¹), adapta-se a diversos sistemas de produção. A cultivar apresenta grãos de cor marrom, ciclo de 90 a 100 dias e altura de \cong 2,5 m. Apesar do porte alto, este material é resistente ao acamamento. Apresenta resistência ao míldio e moderada resistência à antracnose, ferrugem e helmintosporiose (Rodrigues et. al., 2008).

2.1.4.4. Sorgo CMSXS 769

Híbrido forrageiro para a produção de silagem, linhagem fêmea, material experimental da Embrapa Milho e Sorgo.

2.2. Classificação botânica e origem do arroz

De acordo com a classificação botânica, a planta de arroz pertence à classe Liliopsida (monocotiledôneas), à ordem Cyperales, à família Poaceae (gramíneas) e ao gênero *Oryza*, que possui mais de 20 espécies, sendo apenas duas delas cultivadas, *Oryza sativa* L. (arroz asiático) e *Oryza glaberrima* Steud. (arroz africano) (Lopes, 2002; Rosso, 2006; Pinheiro, 2008; USDA, 2016). *O. sativa* é cultivada em todos os continentes, com exceção da Antártida, e é uma das espécies mais importantes para a nutrição humana, havendo relatos de sua produção e consumo que remontam a 10.000 a.C. (GRiSP, 2013). Não há

consenso sobre o local de origem do arroz cultivado. A hipótese do local único de origem propõe que a domesticação teria ocorrido em lugares como a Índia, China e a região das montanhas do sudoeste da Ásia. Ao contrário, a hipótese da origem em múltiplas regiões propõe que a domesticação ocorreu de forma independente em vários locais, como as planícies do rio Ganges na Índia, nas regiões setentrionais de Mianmar, da Tailândia, do Laos e do Vietnã, e o sul e sudeste da China (Toro, 2006). *O. glaberrima* foi domesticada há cerca de 3.000 anos em uma única região africana ocidental, ao longo do rio Níger.

Como resultado dos processos de domesticação da espécie *O. sativa* sob diferentes condições ecológicas (sequeiro, irrigado ou em águas profundas), em regiões geográficas diversas (áreas de várzea e terras altas), tanto sob clima tropical quanto temperado, a maior parte das cultivares pode ser classificada em duas importantes subespécies de arroz: *O. sativa* spp. *Indica* e *O. sativa* spp. *Japonica* (Lopes, 2002; Pinheiro, 2008).

Cultivares de arroz irrigado da subespécie *Indica* são utilizadas extensivamente nas áreas tropicais e subtropicais, ao passo que cultivares da subespécie *Japonica* predominam nas regiões temperadas. No entanto, são também utilizadas nos trópicos, geralmente em terras altas (arroz de sequeiro). Quanto ao formato dos grãos, cultivares da subespécie *Indica* possuem grãos longos, estreitos e levemente planos e aqueles das cultivares da subespécie *Japonica* são curtos, largos e espessos, com seção transversal arredondada (Rosso, 2006; Toro, 2006).

2.2.1. Morfologia e fenologia da planta de arroz

O arroz cultivado é geralmente considerado uma planta anual semiaquática. Entretanto, nos trópicos, pode apresentar-se como planta perene, produzindo novos perfilhos, a partir de nódulos, após a colheita, formando uma soqueira (GRiSP, 2013). Apresenta sistema fotossintético C3, sendo adaptado a solos alagados devido à presença de aerênquima no colmo e nas raízes da planta, o que possibilita a passagem de oxigênio do ar para a camada da rizosfera (Vieira et al., 1999, Taiz et al., 2017). Na maturidade, a planta de arroz é composta por raízes, folhas, caule principal, perfilhos, além de panículas que correspondem a um conjunto de espiguetas (Figura 2). Cada perfilho produtivo

contém uma inflorescência terminal ou panícula. A altura da planta varia de 0,4 a 5,0 m, de acordo com a cultivar e as condições ambientais (Soares, 2004).

Morfologicamente, o crescimento da planta de arroz está dividido em três fases conforme apresentado na Figura 3 (Vieira et al., 1999; Soares, 2004; Monteiro, 2009):

1. Fase vegetativa: estende-se da germinação à iniciação do primórdio floral. Corresponde aos estágios de germinação à emergência, plântula e perfilhamento. É a principal responsável pela duração do ciclo total da cultura. Caracteriza-se pelo perfilhamento ativo, aumento lento da altura e emergência de folhas;
2. Fase reprodutiva: estende-se da iniciação do primórdio floral ao florescimento. Engloba os estádios de alongamento dos colmos-entrenós, de emborrachamento, de exerceção da panícula e de floração;



Figura 2. Representação esquemática da planta de arroz. Fonte: Harper (2016).

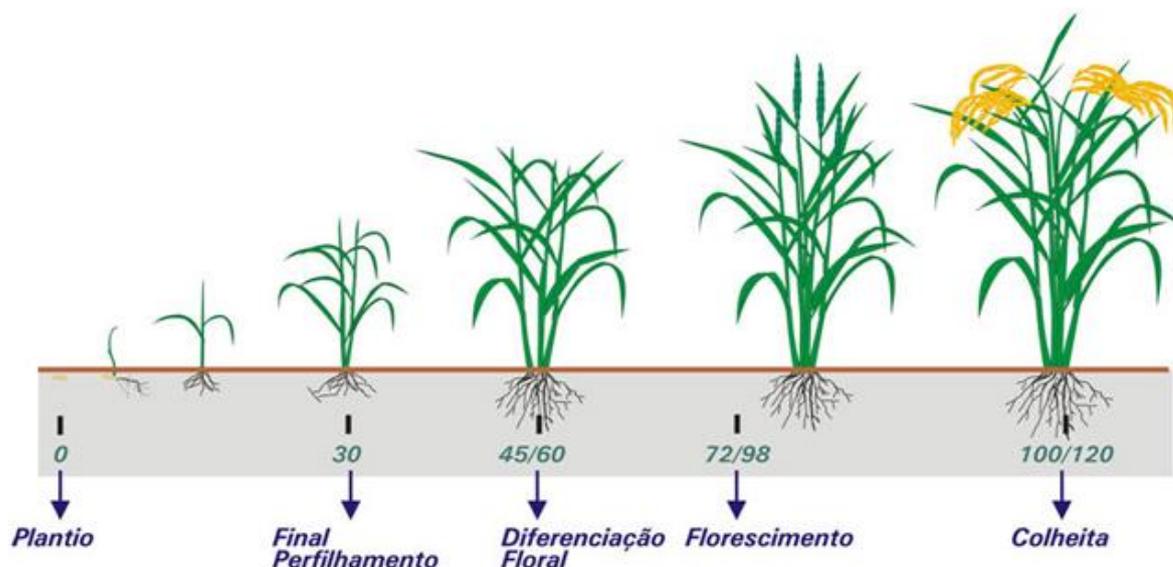


Figura 3. Fases fenológicas do arroz. Fonte: adaptada de Embrapa (2018).

3. Fase de maturação: é a etapa final do ciclo de vida da planta, vai do florescimento à maturação dos grãos e abrange os estádios de grão leitoso, pastoso e maturo.

2.2.2. Características das sementes de arroz

Comercialmente, o arroz é propagado pelo uso de sementes. De acordo com Carvalho e Nakagawa (2012), as sementes são produtos mais nobres e caros do que os grãos quando se considera a cadeia produtiva de alimentos, pois há que preservar sua qualidade fisiológica para reprodução das espécies ao longo do tempo.

A semente e o grão se diferenciam quanto à destinação final e em alguns cuidados no campo de produção. A semente é produzida com a finalidade de plantio, com cuidados especiais e obedecendo a normas técnicas, procedimentos e padrões estabelecidos pela legislação. A qualidade da semente envolve um somatório de atributos relacionados às suas qualidades genética, física, fisiológica e sanitária (Embrapa, 2018). A semente é destinada à propagação da espécie, ou seja, ela deve apresentar todas as estruturas essenciais para produção de uma nova planta e tem que estar viável e sadia. O grão é destinado a comercialização,

industrialização e consumo, sendo poupado de alguns cuidados e critérios utilizados na produção e classificação das sementes.

A semente do arroz consiste do fruto verdadeiro ou o arroz integral (cariopse) e a casca. O arroz integral é composto principalmente do embrião e do endosperma, que contém várias camadas de tecidos diferenciados para originar uma nova planta (Soares, 2004).

Apresenta-se, na Figura 4, a representação esquemática das estruturas de uma semente de arroz. A pálea, a lema e a ráquila constituem a casca do arroz da subespécie *Indica*, sendo a lema maior que a pálea. As laterais da lema revestem as laterais da pálea, possibilitando o fechamento firme do conjunto (Guimarães et al., 2002). No arroz da subespécie *Japonica*, a casca geralmente apresenta glumas rudimentares e, algumas vezes, uma porção do pedicelo. Uma única semente seca de arroz tem massa de 10 a 45 mg. O comprimento, a largura e a espessura da semente variam de acordo com a cultivar. Em média, a massa da casca corresponde a aproximadamente 20% da massa total da semente (GRiSP, 2013).

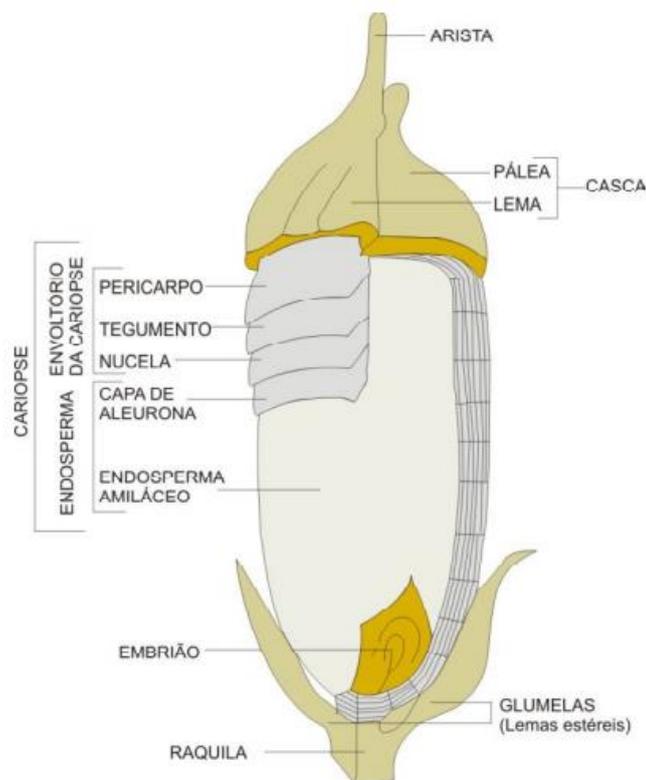


Figura 4. Representação esquemática das estruturas de uma semente de arroz. Fonte: Fonseca et al. (2008).

A casca é porosa, leve e rica em sílica (15 a 18%) (Vieira et al., 1999; Guimarães et al., 2002). A principal função da casca é proteger o fruto contra o ataque de insetos ou fungos. A camada de aleurona constitui a capa mais externa do endosperma, envolvendo também a parte externa do embrião, sendo formada por várias camadas de células parenquimatosas. As células de aleurona são ricas em proteínas e lipídios (Vieira et al., 1999; Guimarães et al., 2002; Soares, 2004).

2.2.3. Sistema de cultivo

No Brasil são considerados dois grandes ecossistemas para a cultura do arroz, o de várzeas, em que a cultura é irrigada por inundação controlada, e o de terras altas, englobando o cultivo com irrigação suplementar, por aspersão, e o cultivo em sequeiro (Monteiro, 2009).

O arroz irrigado é cultivado na região subtropical, concentrando-se basicamente na Região Sul do Brasil, nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, responsáveis por 80,4% da produção nacional em 2016. O cultivo do arroz de terras altas predomina na Região Nordeste do país, principalmente nos Estados do Maranhão e do Tocantins, que, juntos, detiveram 6,4% da produção brasileira naquele mesmo ano (IBGE, 2018).

2.2.4. Produção e composição centesimal

A Ásia é a principal região produtora de arroz, onde se concentra aproximadamente 90% da produção mundial. Os países que se destacam são China, Índia e Indonésia, responsáveis, respectivamente, por 28%, 21% e 10% da produção mundial em 2016 (FAO, 2018). No continente americano, o Brasil é o principal produtor de arroz, com produção de 10,6 milhões de toneladas, o que representa, aproximadamente, 1,4% do total mundial e cerca de 30% da produção das Américas (FAO, 2018; IBGE, 2018).

O arroz é um cereal importante na alimentação de grande parcela da população mundial, constituindo alimento básico para mais da metade dos seis bilhões de habitantes do planeta. Como se pode observar na Tabela 1, trata-se de alimento rico em proteínas e vitaminas do complexo B e vitamina E (Walter et al., 2008; TACO, 2013). Atualmente estima-se que o consumo médio per capita diário

de arroz beneficiado polido no Brasil corresponde a 152,9 g, o que equivale a um consumo médio anual de 55,8 kg por habitante (Brasil, 2017).

Tabela 1. Composição centesimal média de arroz integral e arroz branco polido.

Componente	Arroz integral	Arroz branco polido
Umidade, %	12,2	13,2
Energia, kcal	360,0	358,0
Proteína, g	7,3	7,2
Lipídios, g	1,9	0,3
Carboidratos, g	77,5	78,8
Fibras, g	4,8	1,6
Cinzas, g	1,2	0,5
Cálcio, mg	8,0	4,0
Magnésio, mg	110,0	30,0
Vitamina B1, mg g ⁻¹	2,9 – 6,1	0,2 – 1,1
Vitamina B2, mg g ⁻¹	0,4 – 1,4	0,2 – 0,6
Vitamina B3, mg g ⁻¹	35,0 – 53,0	13,0 – 24,0
Vitamina B5, mg g ⁻¹	9,0 – 15,0	3,0 – 7,0
Vitamina E, mg g ⁻¹	9,0 – 25,0	traço – 3,0

Fontes: Walter et al. (2008); TACO (2013).

2.2.5. Cultivares de arroz

A preferência do mercado brasileiro é por cultivares que produzam arroz de grão longo fino (agulhinha), translúcido, com bom aspecto visual (sem defeitos), alta renda do benefício ($\geq 70\%$) e alto rendimento industrial de grãos inteiros ($> 60\%$). Após a cocção, os grãos de arroz branco polido devem permanecer secos, macios, soltos e com o centro bem cozido. O arroz que após o preparo ficar com os grãos mais pegajosos não tem boa aceitação pelo consumidor brasileiro. Esse comportamento na cocção está associado, principalmente, ao teor de amilose no amido dos grãos e à temperatura de gelatinização. Cultivares que possuem grãos com teores intermediário ou alto de amilose ($\geq 23\%$) e temperatura de gelatinização baixa ou intermediária (63 a 73 °C) apresentam melhor desempenho na panela (Sosbai, 2012).

Neste trabalho foram utilizadas as cultivares de arroz BRS Esmeralda, BRS GO Serra Dourada, BRS Sertaneja e BRS Tropical. As cultivares precedidas

pela sigla BRS foram desenvolvidas pela Embrapa e são destinadas a cultivos em terras altas. A BRS GO Serra Dourada é fruto de parceria entre Embrapa, Emater – GO e a Universidade Federal de Goiás – UFG e também foi desenvolvida para cultivos em terras altas. Sendo assim, apresentam-se, a seguir, breves descrições das cultivares mencionadas anteriormente, ressaltando que todas produzem grãos do tipo agulhinha ou classe longo fino (ver item 2.2.7.6., Beneficiamento, subitem C, página 35).

2.2.5.1. BRS Esmeralda

Destaca-se pela alta produtividade e qualidade de grãos, apresentando potencial produtivo para até 7.525 kg ha⁻¹. É moderadamente resistente às principais doenças e possui maior tolerância ao estresse hídrico. As plantas são vigorosas e com boa arquitetura e senescência tardia (*stay green*). Os colmos são fortes e flexíveis, diminuindo o risco de acamamento. Possui teor de amilose baixo e temperatura de gelatinização intermediária/alta (semelhante à cultivar BRS Primavera), o que lhe confere as características de maciez, boa solubilidade após curto tempo de maturação pós-colheita. Com relação ao centro branco, esta cultivar apresenta nota média de 2,3 em uma escala de 1 a 7, em que 1 corresponde a grãos classificados como totalmente translúcidos (Castro et al., 2014).

2.2.5.2.. BRS GO Serra Dourada

Trata-se de cultivar especialmente desenvolvida para sistemas agrícolas com uso menos intenso de tecnologia e em pequenas propriedades, com moderada resistência a brusone e apresentando médias de produtividade de 3.500 kg ha⁻¹. Apresenta rendimento de grãos inteiros de 57% (Melo et al., 2009; Embrapa, 2014).

2.2.5.3. BRS Sertaneja

Cultivar precoce caracterizada por plantas vigorosas, moderadamente perfilhadoras, porte médio (108 cm), folhas largas, e com mediana resistência ao

acamamento. Apresenta moderada resistência à mancha parda, escaudadura e mancha de grãos. Suas panículas são longas, com elevado número de grãos. O rendimento de inteiros no beneficiamento é alto (70%) e estável, com grãos beneficiados translúcidos. A produtividade média de grãos é de 3.753 kg ha⁻¹. Quanto às propriedades de cocção, a BRS Sertaneja é muito similar a BRS Primavera, ou seja, oferece excelente qualidade. Aos 30 dias após a colheita os grãos da BRS Sertaneja já se apresentaram razoavelmente soltos após cozidos e, aos 60 dias, o produto apresentou-se plenamente solto. Portanto, trata-se de um produto que não necessita de longo tempo de estocagem antes do beneficiamento e comercialização (Breseghello et al., 2006).

2.2.5.4. BRS Tropical

A cultivar possui arquitetura de planta moderna com folhas eretas e altura média de planta de 110 cm. A floração média varia de 78 dias (em RR) a 110 dias (no MS). Sobressai-se pela menor suscetibilidade a doenças como a brusone e pela excelência na qualidade de grãos. A produtividade média é de 6.900 kg ha⁻¹, com rendimento de grãos inteiros de 62% e com baixo índice de centro branco. A BRS Tropical apresenta teor de amilose alto e temperatura de gelatinização baixa, características determinantes para os grãos ficarem macios e soltos após a cocção (Cutrim et al., 2008).

2.2.6. Colheita de sementes e grãos de arroz

A maturidade fisiológica das sementes de arroz ocorre quando seu teor de água encontra-se entre 28% e 30%. Depois de alcançar este ponto, as sementes permanecem “armazenadas” temporariamente no campo até que atinjam o ponto ideal ou o momento correto para se proceder à colheita. Recomenda-se fazer a colheita quando as sementes apresentarem grau de umidade de 20% a 22% e nunca exceder o limite inferior de 18% ou superior de 24% (Vieira et al., 1999).

Em caso de se realizar a colheita quando o teor de água das sementes for superior a 24%, diz-se que a colheita é precoce, situação em que se tem maior percentual de espiguetas vazias. Sendo assim, haverá menor produção de

sementes e aumento no número de sementes gessadas. Isso acarreta problemas de limpeza e perdas na batidura, aumentando os custos com a operação de secagem (Vieira et al., 1999; Soares, 2004). Estes mesmos autores afirmam que a colheita tardia, quando as sementes estiverem com teor de água inferior a 18%, gera aumento no número de trincas, o que acarreta menor percentual de sementes inteiras no beneficiamento, ocorrência de perdas no campo devido a maior debulha natural e acamamento de plantas, dificultando a operação de colheita. A colheita tardia expõe a lavoura a riscos climáticos e ao ataque de pragas, devido à permanência do produto no campo por maior período de tempo.

No campo, determina-se o ponto de colheita quando aproximadamente 2/3 da panícula apresentam espiguetas com a coloração característica da cultivar ou quando os grãos endurecem (grãos vítreos) e resistem à penetração quando pressionados com a unha (Epagri, 2012).

A colheita pode ser realizada manualmente ou mecanicamente. A colheita manual é utilizada amplamente no Brasil por pequenos agricultores, pois apresenta custo mais baixo. Consiste em cortar as plantas a uma altura de 15 a 20 cm em relação ao nível do solo, formar feixes, trilhar e/ou emedar. A trilha pode ser manual (bateção) ou mecânica (trilhadeira). A colheita mecânica é realizada com colhedoras automotrizes que são responsáveis pelo corte e trilha imediata em uma só operação. Atualmente, é o método mais empregado, sobretudo em grandes áreas cultivadas (Vieira et al., 1999).

2.2.7. Pós-colheita (recepção, pré-limpeza, secagem, limpeza, classificação, beneficiamento e armazenamento) de sementes e grãos de arroz

O responsável pela unidade de pré-processamento é quem decidirá se o lote do arroz proveniente do campo deve ser submetido à secagem imediata ou passar primeiramente pela pré-limpeza. Assim, o recepcionista deverá determinar os teores de água e de impurezas dos grãos, bem como manter separadamente os grãos de cada cultivar. No caso de sementes, os lotes devem ser individualizados e devidamente identificados com o nome do produtor, procedência, quantidade e os teores de água e de impurezas antes de ser encaminhados para o beneficiamento (Fonseca e Silva, 2006).

2.2.7.1. Pré-limpeza

A pré-limpeza promove a retirada das impurezas mais grosseiras presentes no material, geralmente maiores que os grãos, como pedras, torrões, folhas, palhas, insetos e sementes de plantas daninhas ou de outras espécies que possam dificultar a passagem dos grãos pelos elevadores e reduzir a eficiência dos processos de secagem e beneficiamento (Soares, 2004; Fonseca e Silva, 2006).

A pré-limpeza pode ser realizada utilizando-se: 1. Ventilação, que elimina impurezas mais leves que o grão de arroz; 2. Peneiras, que separam impurezas maiores e grãos que se diferenciam em espessura e 3. Imantação, que utiliza um ímã para separar impurezas metálicas dos grãos (Soares, 2004).

Para realizar a pré-limpeza deve-se escolher criteriosamente o jogo de peneiras, ajustando-se o fluxo de ar e de grãos na máquina. Há que inspecionar periodicamente o equipamento e examinar tanto grãos como impurezas descartadas, para verificar a eficácia e a eficiência da operação. Nas máquinas de pré-limpeza com duas peneiras, a peneira superior retém os contaminantes maiores que a semente de arroz e a peneira inferior possibilita a separação das impurezas menores. As principais vantagens da pré-limpeza são: 1. Remoção das impurezas maiores, que dificultam o fluxo de massa de sementes pelas máquinas e esteiras (transportadores); 2. Remoção do material ainda verde, com alto teor de água, aumentando a eficiência da operação de secagem e melhoria da eficiência das operações subsequentes, como classificação do produto e 3. Aumento da capacidade da máquina de limpeza (Vieira et al., 1999; Fonseca e Silva, 2006).

2.2.7.2. Secagem

Como visto anteriormente, o arroz é colhido, na maioria das vezes, com grau elevado de umidade e com grande quantidade de impurezas e matérias estranhas, sendo necessário o processo de pré-limpeza antes da secagem dos grãos. A operação de secagem consiste em reduzir o teor de água do produto a valores considerados como adequados à sua conservação e assim permitir que o produto possa ser armazenado por um longo período de tempo (Hacihafizoğlu et

al., 2008). Para o armazenamento a granel, recomenda-se que o teor de água final após a secagem seja de 13% a 14%; para armazenamento em sacaria, 14% a 15% (Madamba e Yabes, 2005).

A secagem dos grãos e/ou sementes deve ser iniciada imediatamente após a colheita ou, no máximo, até 24 h após a colheita, pois o arroz recém-colhido com alto teor de água provoca o aquecimento natural da massa de grãos e pode desencadear processos de germinação e fermentação. Mas, isso não sendo possível, é importante pré-limpar, aerar ou pré-secar o arroz (Teter, 1987; Epagri, 2012). A secagem é importante para a qualidade final do produto beneficiado. Caso seja inadequada, deprecia a qualidade do grão e pode matar o embrião da semente. Apresenta-se, na Tabela 2, um esquema mostrando os diferentes sistemas de secagem de grãos (Silva et al.; 2000a). Alguns desses sistemas, principalmente aqueles empregados na secagem de arroz, encontram-se brevemente descritos a seguir. A secagem natural não é recomendada para o arroz, tendo em vista o alto índice de perdas devido à debulha que ocorre no campo antes que os grãos atinjam o teor de água de 13%.

Tabela 2. Classificação dos sistemas de secagem

Natural (no campo, na própria planta)					
	Ventilação natural	Terreiros e paióis			
		Secagem solar			
		Outros			
		Ar natural			
Artificial	Ventilação forçada	Altas temperaturas	Quanto aos fluxos ar/grãos	Camada fixa	
				Cruzados	
				Concorrentes	
				Contracorrentes	
				Mistos	
				Quanto à operação	Rotativo
					Fluidizado
					Intermitentes
					Contínuos
		Baixas temperaturas			
		Sistemas combinados			
		Seca-aeração			
	Convecção				

Fonte: Silva et al. (2000a).

A secagem artificial é caracterizada pela utilização de processos manuais ou mecânicos tanto no manejo do produto quanto na passagem do ar através da massa de grãos. No caso do terreiro e do paiol, a secagem ocorre pela ventilação natural (ação dos ventos), mas na maioria dos casos o ar é forçado por meio de ventiladores. Em alguns secadores o ar de secagem é movimentado por meio de correntes de ar convectivas (Silva et al.; 2000a).

A secagem ao sol é utilizada para pequenas áreas de cultivo ou para volumes reduzidos de produto, sendo geralmente realizada em terreiros cimentados ou forrados com lonas. Se o arroz estiver muito úmido, deve-se espalhá-lo em camadas delgadas, com cerca de 4 a 5 cm, e à medida que a secagem avança, adotam-se camadas mais espessas (8 a 10 cm) (Silva et al.; 2000b). Durante a secagem ao sol, para reduzir o surgimento de trincas no produto, a camada de arroz deve ser revolvida a cada hora, pois nestas condições os grãos podem atingir de 45 a 55 °C. Durante a noite, recomenda-se enleirar a massa do produto e cobri-la com lona plástica para evitar a reabsorção de água em função da maior umidade relativa do ar e orvalho (Soares, 2004).

Para as demais condições, a secagem artificial de arroz é realizada, basicamente, por ventilação forçada, empregando-se tanto altas quanto baixas temperaturas. Define-se secagem em altas temperaturas aquela em que o ar é aquecido por, no mínimo, 6 °C acima da temperatura ambiente (Brooker et al., 1992). Na secagem em altas temperaturas, os procedimentos mais comuns são a secagem em camada fixa, com fluxo ascendente de ar, e a secagem em fluxos cruzados e mistos. Quanto à operação, o processo é geralmente intermitente, ou seja, os períodos de secagem são intercalados com períodos de repouso, em que não há passagem do ar de secagem através da massa de grãos. O período de repouso promove a difusão da água do interior para a periferia do grão e a evaporação ocorre de maneira mais branda e equilibrada (Aguerreta et al., 2007; Saravia et al., 2007; Dong et al., 2009). Assim, o produto sofre a ação do calor em intervalos curtos e alternados, com períodos maiores de repouso para permitir o resfriamento e homogeneização da umidade por toda a massa (Dong et al., 2009). Soares (2004) destaca que este é o método de secagem artificial mais recomendável para o arroz, uma vez que atenua o trincamento dos grãos, devido à homogeneização da umidade da massa.

Quando destinado para sementes, para evitar danos ao embrião indica-se que o arroz seja secado de forma que a temperatura do produto não ultrapasse 40 °C, até atingir 13% a 14% de umidade. Na secagem de grãos para consumo, a temperatura do grão não deve ultrapassar 55 °C. Em geral, a secagem em altas temperaturas é realizada em secadores de alta capacidade nominal, de 10 a 30 t h⁻¹ (pequeno porte), de 40 a 100 t h⁻¹ (médio porte) e de 120 a 200 t h⁻¹ (grande porte) (Teter, 1987; Silva et al.; 2000b; Fonseca e Silva, 2006).

A secagem de lotes do produto em altas temperaturas, com subsequente armazenagem em silos, é método relativamente simples para reduzir o teor de água de grãos de arroz. Esse processo é denominado secagem de lotes em leito fixo. Na sua forma mais comum, a secagem de lotes é feita em silos metálicos providos de ventilador, câmara *plenum* e assoalho perfurado, por onde passa o ar (Figura 5). O princípio de operação desses secadores é forçar grandes volumes de ar quente (em torno de 20 m³ min⁻¹ t⁻¹), de forma intermitente, através de camadas pouco profundas de grãos (0,6 a 0,9 m), de forma a obter uma secagem rápida. A secagem deve ser intercalada por períodos de repouso, pois altas taxas de secagem, ou seja, remoção de água maior que três pontos percentuais por hora, provocam trincas nos grãos. No Brasil, esforços têm sido desenvolvidos para diminuir os custos iniciais desse sistema. Para tanto, o silo metálico está sendo substituído por uma construção de tijolos com altura suficiente para acomodar o plenum e a câmara de secagem (Teter, 1987; Silva et al.; 2000b; Epagri, 2012).

Em razão de se interromper a secagem quando é atingido o teor de água médio dos grãos (12 a 13%), há gradiente de umidade no lote depois da secagem. O produto mais próximo da entrada de ar fica superseco (8% b.u.) e o mais afastado, às vezes, permanece com o teor de água próximo do valor inicial (20%). Esse gradiente é parcialmente reduzido durante o resfriamento. Transferidos para os silos de armazenagem, os grãos úmidos misturam-se com os supersecos e, por difusão, o gradiente de umidade reduz-se gradualmente (Teter, 1987).

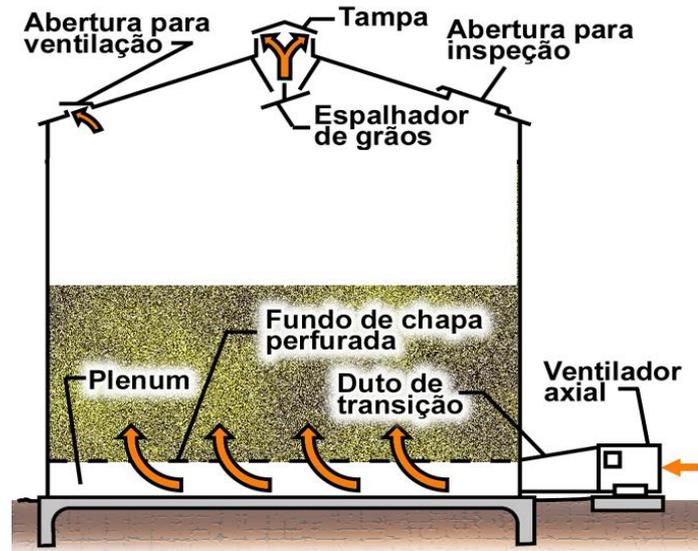


Figura 5. Silo secador para secagem intermitente de lotes de arroz. Fonte: adaptada de MWPS (1980).

Outra forma de realizar a secagem de arroz em altas temperaturas é a secagem intermitente, com diversas passagens do lote por secadores de fluxos mistos, também conhecidos como secadores do tipo cascata ou de calhas. Esses secadores são constituídos por uma série de calhas invertidas, em forma de V, dispostas em linhas alternadas ou cruzadas dentro do corpo do secador (Figura 6). Os grãos movem-se para baixo sobre as calhas invertidas e o ar de secagem entra em uma linha de calhas e sai nas outras imediatamente adjacentes. Nesse secador, há a combinação de secagem em fluxos concorrentes, cruzados e contracorrentes. Esse fator, aliado à mistura dos grãos, ao se moverem no secador, faz com que a secagem seja uniforme e o produto final de boa qualidade (Silva et al.; 2000a).

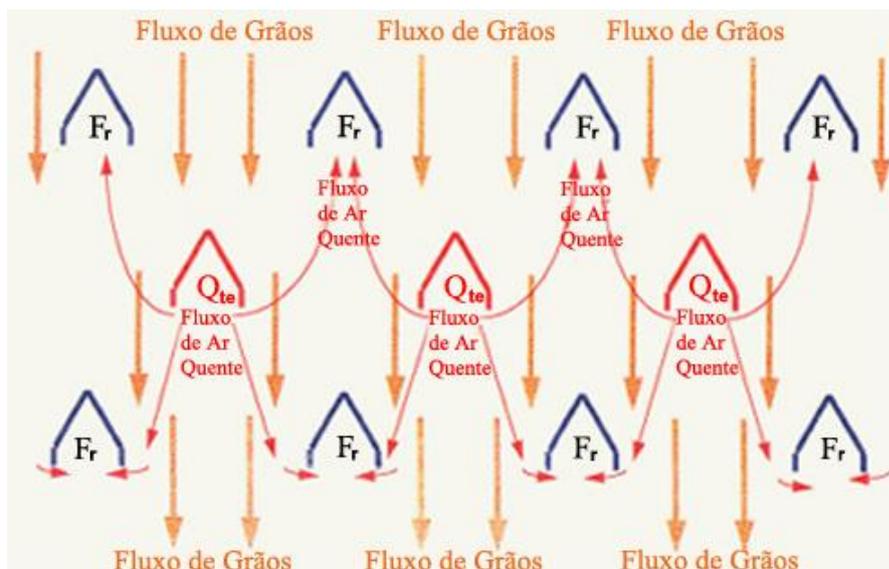


Figura 6. Detalhe dos fluxos de ar e de grãos no interior de secadores do tipo cascata ou de calhas. Q_{te} = dutos de entrada de ar quente; F_r = dutos de exaustão de ar frio. Adaptada de MWPS (1980).

2.2.7.3. Limpeza

A operação de limpeza de sementes de arroz é realizada, geralmente, pela máquina de ar e peneiras (MAP). Esse equipamento é composto de jogos de peneiras com perfurações muito próximas ao tamanho da semente, que servem para remover as impurezas que a pré-limpeza deixou passar. Possui, também, um sistema de ventilação que aspira ou sopra as impurezas mais leves que a semente. Os lotes de sementes de arroz apresentam diferentes contaminantes quanto ao tipo e ao tamanho, que implicam na escolha do jogo de peneiras a ser utilizado. O jogo de peneiras mais indicado para o beneficiamento da semente de arroz são as peneiras com perfurações redondas e oblongas. Na MAP, a semente de arroz passa através da peneira superior, com perfurações redondas, que servem para separar as impurezas de largura superior à largura da semente. A peneira inferior, com perfurações oblongas, retém a semente de arroz e deixa passar as impurezas menores (Vieira et al., 1999).

2.2.7.4. Separação (grãos quebrados e descascados) e mesa densimétrica

Após a limpeza, quando necessário, o arroz deve ser conduzido às máquinas de separação, que fazem o acabamento final do arroz em casca e o aprimoramento do produto, eliminando, com base em certas características diferenciais, as impurezas não removidas nas máquinas de pré-limpeza e limpeza.

Na separação, empregam-se equipamentos chamados de cilindros alveolados ou *trieur* que separam os grãos/sementes quebrados e descascados que não tenham sido separados na MAP. Além dos cilindros, utiliza-se, também, a mesa de gravidade ou densimétrica, que separa os grãos em diferentes valores de massa específica. Esse equipamento tem se mostrado bastante útil no arroz de terras altas, pois como esse sistema de cultivo é mais sujeito a estresses ambientais (secas), a ocorrência de grãos mais leves e de baixa qualidade é mais frequente. Dessa forma, a mesa de gravidade elimina as sementes mais leves que, embora não se diferenciem das mais pesadas de melhor qualidade, na forma ou dimensões, não foram removidas pelos equipamentos de limpeza e cilindros alveolados. A disposição da mesa de gravidade na unidade de pré-processamento deve ser de tal modo que fique sempre no final da linha, isto é, após as máquinas de limpeza e separação, posicionando-se antes do beneficiamento, quando for o caso, e da embaladora (Fonseca e Silva, 2006).

2.2.7.5. Armazenamento

A armazenagem de arroz em casca é a operação que visa preservá-lo, geralmente em ambiente natural, mantendo sua viabilidade como semente, e sem que perca a boa aparência e as qualidades sensoriais e nutricionais no caso de ser utilizado como grãos para consumo. Então, o arroz deve ser armazenado sob condições ideais, obedecendo-se a critérios como o baixo teor de água para minimizar a taxa de respiração devido à atividade enzimática e o crescimento de micro-organismos, que são responsáveis pela redução da matéria seca da massa de grãos e podem produzir energia suficiente para a deterioração da qualidade do produto (Ondier et al., 2010).

De acordo com a Lei 9.973, de 29/05/2000 (Brasil, 2000), além do armazenamento do produto em condições naturais, o acondicionamento pode também ser feito em ambientes com ar resfriado. No primeiro caso, o ideal é que o arroz seja armazenado já seco com teor de água entre 12% e 13%. No armazenamento refrigerado, o teor de água dos grãos pode ser maior, havendo, no entanto, a necessidade de secagem posterior para que o produto possa ser comercializado ou industrializado na forma polida ou integral (Epagri, 2012).

Para a conservação de sementes em longo prazo, devem-se conhecer, além da sua condição inicial, suas características específicas de armazenamento. Roberts (1973) propôs a classificação das sementes quanto às suas características de armazenamento em duas categorias: ortodoxas e recalcitrantes. Ortodoxas são aquelas que podem ter o seu teor de água reduzido pela secagem até graus de umidade muito baixos (2% a 5%) e que suportam baixas temperaturas, inclusive as temperaturas sub zero empregadas na conservação em longo prazo, sem ter a sua viabilidade comprometida. As sementes que não toleram dessecação até níveis abaixo de 10%, conforme a espécie, e que não sobrevivem em temperaturas sub zero receberam a denominação de recalcitrantes. Quanto ao armazenamento a semente de arroz é classificada como ortodoxa, porque tolera o armazenamento por um longo período de tempo em baixas temperaturas e com baixo teor de água, sem perder a viabilidade.

Carvalho e Nakagawa (2012) enumeram os fatores que afetam a manutenção da qualidade das sementes ao longo do tempo, destacando o grau de umidade, as condições do ambiente de armazenamento, principalmente a temperatura e a umidade relativa do ar e o tipo de acondicionamento utilizado. Além disso, a longevidade das sementes é influenciada por outros fatores, tais como espécie, variedade e histórico do lote de sementes.

O arroz em casca pode ser armazenado a granel, em silos, ou em sacarias nos armazéns convencionais. No Brasil, os diferentes tipos comerciais de arroz fazem com que haja predominância do sistema de armazenagem em sacarias. Esta proporção se fundamenta no fato de que a armazenagem a granel necessitaria de número expressivo de silos para acondicionar as diferentes classes e tipos, elevando significativamente o custo inicial das instalações. Entretanto, nas regiões de grande produção, principalmente de lavouras irrigadas,

onde pode ser conseguida maior padronização dos grãos, a armazenagem a granel é mais utilizada, principalmente em grandes fazendas e cooperativas. Outro fator de importância na predominância da armazenagem em sacarias é cultural. O produtor tradicional de arroz, mesmo ciente do maior custo operacional, prefere ver seu produto individualizado no armazém, o que só é possível formando lotes com o produto ensacado (Silva et al., 2000b).

Para a prática segura do armazenamento a granel é necessário que o sistema disponha dos seguintes componentes básicos: 1. Silos para o acondicionamento do produto; 2. Sistema de aeração para permitir a remoção de eventuais focos de aquecimento e odores indesejáveis, além da homogeneização da temperatura da massa de grãos e 3. Sistema de termometria para o monitoramento diário da temperatura do produto durante a armazenagem (Silva et al., 2000b).

2.2.7.6. Beneficiamento

O beneficiamento consiste na entrada dos grãos de arroz na unidade beneficiadora onde são realizadas as etapas de descascamento, brunimento e culmina com a saída do produto limpo e classificado, visando à melhoria de sua qualidade para a comercialização. É um procedimento baseado nas diferenças existentes entre as características físicas dos grãos de arroz e as impurezas.

No beneficiamento, os grãos são descascados em máquinas providas de dois roletes de borracha, que giram em sentidos opostos, em velocidades diferentes, retirando o grão de arroz do interior da casca por um movimento de torção. Nessa operação deve-se observar com cuidado o teor de água ideal recomendado para o processo de forma a evitar a quebra dos grãos. Ao final da etapa de descascamento há que se considerar a presença de grãos marinheiros, que são aqueles que não tiveram a casaca removida durante o processo. Esses grãos são removidos do lote de arroz limpo (sem casca) por meio de movimentos horizontais e verticais e de ventilação. Os marinheiros, por meio de um elevador de canecas, voltam ao descascador. O produto que se obtém ao final do descascamento é denominado arroz integral.

Após a remoção da casca e glumelas, os grãos de arroz passam pelo processo de brunimento, em que a camada mais externa é lixada e

consequentemente retirada, produzindo o farelo de arroz. Esse material removido é um composto rico em nutrientes, sendo empregado para a confecção da farinha de arroz, muito utilizada na alimentação de crianças. O objetivo do brunimento é remover do arroz integral a película de tegumento e o germe, com o mínimo de dano ao grão inteiro, preservando sua forma original. As camadas mais externas dos grãos contêm os nutrientes (vitaminas, parte das proteínas, sais minerais, entre outros) e estas camadas, por possuírem coloração amarelada, são removidas para garantir o aspecto branco do arroz, que é a preferência do consumidor brasileiro, apesar do menor valor nutritivo (Walter et al., 2008).

O processo de brunimento do arroz é realizado por abrasão, por meio do contato dos grãos contra uma superfície áspera em movimento. O polimento do arroz, que é uma operação posterior ao brunimento, se diferencia deste porque os grãos são atritados uns contra os outros, ao mesmo tempo em que o arroz é submetido a uma leve pressão. O arroz brunido é então polido e limpo, sendo posteriormente classificado (Vieira et al., 1999).

A classificação do arroz é feita seguindo os critérios estabelecidos na Instrução Normativa nº. 6 de 2009 (Brasil, 2009), que institui o Regulamento Técnico do Arroz, que define o padrão oficial de classificação, com os requisitos de identidade e qualidade, a amostragem, o modo de apresentação e a marcação ou rotulagem, proporcionando a criação de um sistema de comercialização por classes e tipos, que leva em consideração os fatores de qualidade associados a limpeza, uniformidade, condições sanitárias e pureza do produto.

Os padrões de classificação constituem a base para a avaliação da qualidade para fins de comercialização do produto em casca, integral, polido e parboilizado, bem como dos fragmentos de grão (quebrados e quirera). As designações oficiais no Brasil, utilizadas para enquadramento do produto e marcação da embalagem, são fundamentadas nos parâmetros descritos a seguir (Brasil, 2009):

A. Grupos

O arroz, segundo a forma de apresentação, é classificado nos seguintes grupos:

I. Arroz em casca: é o produto fisiologicamente desenvolvido, maduro e em casca que, depois de colhido, não passou por qualquer preparo industrial ou processo tecnológico;

II. Arroz beneficiado: é o produto maduro que foi submetido a algum processo de beneficiamento e se encontra desprovido, no mínimo, da sua casca.

B. Subgrupos

O arroz em casca e o arroz beneficiado, de acordo com o processo de beneficiamento, são classificados nos seguintes subgrupos:

B.1. Subgrupos do arroz em casca:

a) Arroz natural;

b) Arroz parboilizado: é o produto que foi submetido ao processo hidrotérmico no qual o arroz em casca é imerso em água para uso em processos hidrotérmicos industriais, a uma temperatura acima de 58 °C, por tempo nunca superior a 5 h, seguido de gelatinização parcial ou total do amido e secagem.

B.2. Subgrupos do arroz beneficiado:

a) Arroz integral: é o produto do qual somente a casca foi retirada durante o beneficiamento, mantendo-se intacto o germe e as camadas interna e externa do grão;

b) Arroz polido: é o produto de que, ao ser beneficiado, se retiram o germe, o pericarpo e a maior parte da camada interna do tegumento (aleurona), podendo ainda apresentar grãos com estrias longitudinais visíveis a olho nu;

c) Arroz parboilizado integral: é o grão de arroz integral que foi submetido ao processo de parboilização;

d) Arroz parboilizado polido: é o grão de arroz polido que foi submetido ao processo de parboilização.

C. Classes

O arroz em casca, o arroz beneficiado, o arroz das variedades especiais em casca ou beneficiado e o arroz com premix, em relação às dimensões do grão, são classificados nas seguintes classes:

- I. Longo fino (agulhinha): é o produto que contém, no mínimo, 80% da massa de grãos inteiros medindo 6,0 mm ou mais no comprimento, a espessura menor ou igual 1,9 mm e a relação comprimento/largura $\geq 2,75$, após polimento dos grãos;
- II. Longo: é o produto que contém, no mínimo, 80% da massa dos grãos inteiros medindo 6,0 mm ou mais no comprimento, após o polimento dos grãos;
- III. Médio: é o produto que contém, no mínimo, 80% da massa dos grãos inteiros, medindo de 5,0 mm a menos de 6,0 mm no comprimento, após o polimento dos grãos;
- IV. Curto: é o produto que contém, no mínimo, 80% da massa dos grãos inteiros medindo menos de 5,0 mm de comprimento, após o polimento dos grãos;
- V. Misturado: é o produto que não se enquadra em nenhuma das classes anteriores e apresenta-se constituído pela mistura de duas ou mais delas, sem predominância (80%) de nenhuma.

D. Tipos

O arroz em casca e o arroz beneficiado são classificados em cinco tipos, de acordo com a sua qualidade, expressos por números arábicos de 1 (um) a 5 (cinco) e definidos pelo percentual de ocorrência de defeitos graves, de defeitos gerais agregados ou de grãos quebrados e quirera, em que os limites máximos de tolerância estão estabelecidos em Brasil (2009), podendo ainda ser enquadrado como Fora de Tipo e Desclassificado.

O produto classificado como Fora de Tipo pode ser comercializado como tal, desde que perfeitamente identificado na embalagem, ou pode ser rebeneficiado, desdobrado e recomposto para efeito de enquadramento em tipo. Já aquele desclassificado tem a sua comercialização proibida tanto para consumo humano quanto animal, por encontrar-se em mau estado de conservação,

apresentando-se fermentado, mofado, com odor estranho ou contendo substâncias nocivas à saúde e teores de micotoxinas acima dos limites estabelecidos por legislação específica.

2.2.8. Uso do arroz na alimentação e na indústria

O grão de arroz é amplamente utilizado na alimentação humana e na indústria, principalmente na forma descascada e polida tipicamente conhecida como arroz branco. O grão de arroz também pode ser consumido nas formas de arroz do tipo parboilizado e arroz integral. Porém, a partir da cultura do arroz pode-se obter uma gama de produtos e subprodutos, como matérias-primas para a produção de papel e de produtos artesanais e feno para alimentação animal a partir da palha. A casca pode ser utilizada como combustível, como matéria-prima para a produção de papel e também na obtenção do furfural, que é um produto químico usado na produção de desinfetantes e na indústria de agrotóxicos. O farelo é comumente destinado à alimentação animal e pode ser usado para a produção de óleo cru comestível e na fabricação de outros produtos para a indústria cosmética e farmacêutica. O amido é muito utilizado em lavanderia, na fabricação de adesivos e na indústria de cosméticos. Outro subproduto é o saquê, bebida alcoólica à base de arroz muito consumida em países asiáticos. Os grãos quebrados do arroz (quirera) constituem matéria-prima para a fabricação de cerveja, vinagre, biscoitos, farinha de arroz e outros usos diversos (Soares, 2004).

2.3. Os princípios da capacitância e da condutância para determinação do teor de água de sementes e grãos: conceitos e definições

Como mencionado anteriormente, o método a ser empregado no presente trabalho para estimativa indireta do teor de água de grãos é baseado nas propriedades dielétricas das amostras. Essas propriedades, ϵ' e ϵ'' , são calculadas a partir de valores medidos de capacitância e condutância da amostra de sementes (dielétrico) localizada entre os eletrodos de um capacitor.

2.3.1. Capacitância

O capacitor é um dispositivo utilizado para armazenar carga elétrica e energia. O capacitor é formado por duas placas metálicas de um material condutor, denominado armadura ou eletrodo, separadas por um material isolante ou dielétrico (Saab, 2006). Quando uma voltagem é aplicada através de um capacitor, uma placa fica carregada positivamente enquanto a outra fica carregada negativamente, com o campo elétrico correspondente direcionado da carga positiva para a negativa (Callister e Rethwisch, 2013). A 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 (Halliday et al., 2009), sendo representada pela Eq. (3):

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3)$$

A capacitância de um material é influenciada por fatores como a área do eletrodo (condutor) e a espessura do dielétrico (distância entre os eletrodos). Segundo Callister e Rethwisch (2013), considerando um capacitor de placas planas paralelas, com vácuo na região entre as placas, sua capacitância pode ser calculada pela Eq. (4). O parâmetro $\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF m}^{-1}$ é uma constante universal denominada permissividade elétrica do vácuo. Se um material dielétrico é inserido na região entre as placas do capacitor tem-se a Eq. (5), em que a permissividade ϵ desse meio dielétrico apresenta magnitude maior que ϵ_0 . Dividindo-se C por C_0 obtém-se a Eq. (6), que define a permissividade elétrica relativa ϵ' de determinado dielétrico. Portanto, a permissividade elétrica relativa ϵ' representa a capacidade de armazenamento de cargas elétricas pela inserção de um meio dielétrico entre as placas de um capacitor (Callister e Rethwisch, 2013). Substituindo-se o valor de $\epsilon = \epsilon' \epsilon_0$ na Eq. (5), tem-se a Eq. (7):

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{\ell} \quad (4)$$

$$C = \varepsilon \frac{A}{\ell} \quad (5)$$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon' \quad (6)$$

$$C = \varepsilon' \varepsilon_0 \frac{A}{\ell} \quad (7)$$

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 para capacitores de placas infinitas, de modo que as distorções das linhas do campo nas bordas do capacitor não existam. No entanto, estas fórmulas podem fornecer boa aproximação quando os valores de ℓ são suficientemente pequenos em relação à área das placas, minimizando o efeito das distorções nas bordas (Moura, 2012).

2.3.2. Condutância

A condutância refere-se à capacidade de determinado material para conduzir corrente elétrica pelo deslocamento de elétrons e íons (Schiffmann, 2006). Callister e Rethwisch (2013) destacam que uma das principais características elétricas de um material é sua condução elétrica. A corrente elétrica resulta do movimento de partículas eletricamente carregadas em resposta a forças que atuam sobre elas a partir de um campo elétrico externamente aplicado. As partículas carregadas positivamente são aceleradas na direção do campo, enquanto as partículas carregadas negativamente são aceleradas na direção oposta. A Lei de Ohm relaciona a corrente elétrica I ou taxa de passagem de cargas ao longo do tempo à voltagem aplicada V de acordo com a Eq. (8). A quantidade que multiplica V , e que apresenta constantes características do condutor, é chamada de condutância G . O inverso da condutância é a resistência R dada pela Eq. (9) (Martins, 1994).

$$I = \left(\frac{JQ^2 A}{\kappa d} \right) V = GV \quad (8)$$

$$R = \left(\frac{\kappa}{JQ^2} \right) \left(\frac{d}{A} \right) = S \left(\frac{d}{A} \right) \quad (9)$$

A resistência é uma medida da oposição ao fluxo de carga e é proporcional ao coeficiente de atrito κ . A constante do primeiro parêntese na Eq. (9) é a resistividade S . O inverso da resistividade é a condutividade σ (Eq. 10).

$$\sigma = \frac{JQ^2}{\kappa} \quad (10)$$

Callister e Rethwisch (2013) destacam que a condutividade elétrica de um material é uma forma de classificá-lo eficientemente em três grupos: condutores, semicondutores e isolantes. Os condutores são os materiais que apresentam condutividade na ordem de 10^6 e 10^7 S m⁻¹, os metais são considerados bons condutores. No outro extremo estão materiais com condutividade muito baixa variando entre 10^{-10} e 10^{-20} S m⁻¹, sendo classificados como isolantes elétricos. Os materiais com condutividades intermediárias geralmente entre 10^{-10} e 10^6 S m⁻¹, são denominados semicondutores.

2.3.3. Propriedades dielétricas

Callister e Rethwisch (2013) definem dielétricos como isolantes elétricos (não metálicos) que exibem ou podem ser produzidos de modo a exibir uma estrutura de dipolo elétrico, ou seja, no nível molecular ou atômico, há uma separação entre as cargas positivas e negativas eletricamente carregadas. São aqueles materiais nos quais os portadores de carga elétrica não encontram facilidade de movimento, sendo, portanto, considerados isolantes (Halliday et al., 2009). São exemplos de dielétricos: plástico, óleo mineral, borracha, mica e ar atmosférico. Para Young e Freedman (2009), o dielétrico é um isolante e colocar um dielétrico sólido entre as placas de um capacitor possui três objetivos:

1. Resolve o problema mecânico de manter duas grandes placas metálicas separadas por uma distância muito pequena, sem que ocorra contato entre elas;
2. Usando um dielétrico torna-se possível aumentar a diferença de potencial máxima entre as placas e
3. 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.

As propriedades dielétricas de muitos materiais dependem da frequência e da intensidade da corrente elétrica alternada aplicada, da temperatura, do teor de água, da massa específica aparente (no caso de materiais granulares), da composição e da estrutura do material. Estudos e aplicações dessas propriedades foram realizados em ovos, grãos, sementes, frutas, vegetais, sucos e vinhos, alimentos assados e moídos, laticínios, peixes e carnes (Lizhi et al., 2008). Nelson (1991) destaca que em materiais higroscópicos, como a maioria dos produtos agrícolas granulares, o teor de água é geralmente o fator dominante.

O interesse nas propriedades dielétricas de materiais agrícolas e produtos alimentares tem como um dos objetivos prever a taxa de aquecimento, definindo seu comportamento quando submetidos aos campos de alta-frequência em aplicação de aquecimento dielétrico ou o então chamado tratamento térmico moderno. A influência das propriedades dielétricas no aquecimento de alimentos por absorção de energia, por meio de radiofrequências ou frequências de micro-ondas, tem sido estudada há algum tempo e tem-se explorado muitos potenciais de aplicação (Morales et al., 2010).

Sob qualquer frequência de oscilação, um material dielétrico pode ser representado por um circuito paralelo equivalente (Figura 7A), que consiste de uma capacitância C e uma resistência R ideais (Berbert, 1995). Desta forma, se o dielétrico fosse submetido a um campo eletromagnético alternado e senoidal de frequência f , o circuito se comportaria como uma reatância puramente capacitiva com um ângulo de fase θ igual a $\pi/2$. No entanto, na prática, quando se submete um dielétrico a um campo de corrente alternada, parte da energia armazenada no capacitor é dissipada na forma de calor. O efeito da existência deste tipo de perda é a redução, de magnitude δ , que ocorre no ângulo de fase θ (Figura 7B), em que

se representa o diagrama vetorial do circuito. Outro termo relacionado à dissipação de energia no dielétrico é a tangente do ângulo δ , também chamada de tangente do ângulo de perdas ou fator de dissipação D . O valor de $\text{tg}\delta$ é calculado a partir dos valores de condutância (G) e capacitância (C), utilizando-se a Eq. (11), em que ω representa a frequência angular, $\omega = 2\pi f$ [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$].

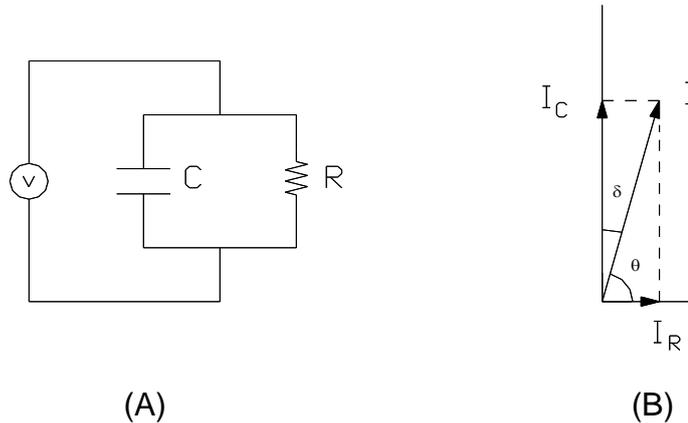


Figura 7. Representação do circuito paralelo equivalente de um dielétrico (A) e o diagrama vetorial do circuito (B). Fonte: Berbert (1995).

$$\text{tg}\delta = \left(\frac{I_R}{I_C} \right) = \left(\frac{\frac{V}{R}}{\frac{V}{X_C}} \right) = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega C} = \frac{G}{\omega C} \quad (11)$$

As propriedades dielétricas dos materiais podem ser descritas mais apropriadamente em termos dos mecanismos de polarização complexos que surgem quando esses materiais são submetidos a um campo senoidal de frequência angular ω . A permissividade elétrica complexa relativa do dielétrico é dada pela Eq. (12). A Eq. (12) é geralmente expressa em sua forma simplificada (Eq. 13), já apresentada anteriormente na Introdução. O tempo de relaxação τ refere-se ao intervalo de tempo necessário para que os dipolos voltem à orientação espacial aleatória original, depois que o campo elétrico é removido. Explicações detalhadas sobre a teoria dos dielétricos e a obtenção das Eqs. (12) e (13), podem ser encontradas em Murphy e Morgan (1937), Von Hippel (1966), Kraus e Carver (1973), Pethig (1979) e em Robert (1988).

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} - j \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (12)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (13)$$

O termo real da permissividade complexa relativa, Eq. (12), representa a permissividade elétrica relativa (ε') do dielétrico, ao passo que o termo imaginário representa o fator de perda dielétrica do material (ε''). A parte real está associada com a capacidade que o material tem de armazenar energia quando está sujeito a um campo elétrico, a parte imaginária refere-se à capacidade do dielétrico dissipar energia na forma de calor (Schiffmann, 2006). A parte imaginária ou dissipativa pode também ser representada pelo produto de ε' pela tangente do ângulo de perdas (Eq. 14).

$$\varepsilon'' = \frac{G}{C_0\omega} = \frac{G\varepsilon'}{C\omega} = \varepsilon' \operatorname{tg}\delta \quad (14)$$

2.3.4. Propriedades dielétricas de produtos agrícolas

Schiffmann (2006) relata que existe uma ampla gama de usos das propriedades dielétricas nas indústrias de madeira, têxteis, alimentos, cerâmicas, pneus e na agricultura. Na maioria dos casos os sistemas são customizados ou aplicáveis a uma única espécie, ou seja, exibem determinados padrões/configurações em função da sua aplicação. Estes variam quanto a faixa de frequência, o tipo de eletrodo, o método empregado, a natureza física e elétrica do material a ser medido (Nelson, 1999), o grau de precisão e as variáveis dielétricas a serem determinadas.

As técnicas mais estudadas atualmente para a determinação das propriedades dielétricas dos materiais empregam radiofrequências (RF) e micro-ondas (MO) (Venkatesh e Raghavan, 2005). RF refere-se a campos eletromagnéticos com frequência entre 300 kHz e 300 MHz, enquanto MO refere-

se a campos com frequências no intervalo entre 300 MHz e 300 GHz (Nelson, 1996).

Na agricultura, as propriedades dielétricas são empregadas principalmente como método indireto e não destrutivo para determinação do teor de água de grãos e sementes. De acordo com Nelson e Trabelsi (2010), o teor de água de grãos e sementes determina o seu momento de colheita, a aptidão para o armazenamento, sendo também utilizado na comercialização desses produtos. Se o teor de água for muito alto para o armazenamento seguro, deve-se proceder à secagem para retirar a umidade em excesso e evitar a deterioração. Os custos de secagem devem ser considerados na determinação de preço para a comercialização.

De acordo com Nelson (2008), os primeiros dados quantitativos sobre as propriedades dielétricas dos grãos foram relatados para a cevada (Nelson et al., 1953), juntamente com um método para a medição confiável dessas propriedades na faixa de frequência de 1-50 MHz. Posteriormente foram obtidos resultados semelhantes para o trigo (Knipper, 1959). Nelson e Trabelsi (2011) destacaram que vários trabalhos envolvendo propriedades dielétricas foram realizados para diversas espécies de grãos de cereais e oleaginosas, tais como trigo (*Triticum aestivum* L.), milho (*Zea mays* L.), cevada (*Hordeum vulgare* L.), aveia (*Avena sativa* L.), soja (*Glycine max* L.), canola (*Brassica napus* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e amendoim (*Arachis hypogaea* L.), com temperatura média de 23 °C e diferentes intervalos de frequência de micro-ondas e de teor de água. Essas medições possibilitaram o desenvolvimento de modelos matemáticos que se adequassem a cada uma destas espécies. Nelson e Trabelsi (2011) afirmaram que para todas as espécies de grãos e sementes estudadas houve uma correlação linear entre as propriedades dielétricas medidas, ϵ' e ϵ'' , e a frequência, o teor de água e a massa específica aparente.

Nelson (2005) cita que outra aplicação das propriedades dielétricas é a detecção do ataque inicial de insetos aos grãos armazenados. O autor utilizou a técnica da espectroscopia dielétrica para determinar a permissividade dielétrica da fase adulta do caruncho do arroz (*Sitophilus orizae* L.), em trigo, sob frequências no intervalo de 250 Hz a 12 GHz. Comprovou-se que a permissividade elétrica relativa do inseto praga foi significativamente maior que a

permissividade elétrica relativa do trigo sob temperatura de 24 °C e massa específica aparente de 490 kg m⁻³.

As propriedades dielétricas foram também utilizadas para avaliação da qualidade e maturidade de frutas frescas como maçã (*Malus domestica* Borkh) (Guo et. al., 2007a; Guo et al., 2011), pêsego (*Prunus persica* L.) (Nelson, 2005), melão (*Cucumis melo* L.) (Guo et. al., 2007b; Nelson et. al., 2006), uva (*Vitis* sp) (Tulasidas et. al., 1995) e laranja azeda (*Citrus aurantium* subsp. Bergamia). Nestes trabalhos os autores correlacionaram as propriedades dielétricas dos tecidos interno e externo do fruto com os teores de água e de sólidos solúveis, sob diferentes frequências.

2.3.5. Fatores que afetam as propriedades dielétricas de grãos e sementes

As propriedades dielétricas são intrínsecas do material e caracterizam a interação entre o material e um campo elétrico, sendo representada pela permissividade elétrica complexa relativa (Eq. 12), em que ϵ' e ϵ'' dependem da frequência, do teor de água, da cultivar, da temperatura e da composição do material. Para materiais granulares elas também dependem da massa específica aparente (Trabelsi e Nelson, 2004).

2.3.5.1. Teor de água e frequência

Como acontece com as demais propriedades físicas de produtos agrícolas, o teor de água também tem influência significativa sobre as propriedades dielétricas de grãos (Nelson e Trabelsi, 2009). Como mencionado anteriormente, essa influência deve-se ao valor comparativamente elevado da permissividade elétrica relativa da água ($\epsilon'_{H_2O} = 80$) em relação àquela da matéria seca dos grãos ($2 \leq \epsilon'_{ms} \leq 5$) (Kaatze, 1996; Pandey et al., 2012). A água tem estrutura dipolar, isto é, enquanto suas moléculas são neutras como um todo, uma das extremidades da molécula tem carga positiva enquanto a outra tem carga negativa. Em tais moléculas um campo elétrico alternado causa oscilações que geram perdas devido à absorção e reflexão de energia, assim quanto maior o

teor de água, maior será a perda (Kandala e Sundaram, 2010; Pandey et al., 2012).

Além disso, as propriedades dielétricas dependem da forma como a água é mantida na matriz do produto. Se a água estiver presente em sua forma livre, as moléculas podem se orientar sem limitações quando um campo elétrico é aplicado e exercerão maior influência nas propriedades dielétricas que a água de ligação. A água ligada é aquela que está quimicamente associada à estrutura do material, ligada a proteínas, açúcares e adsorvida na superfície de partículas coloidais, não podendo se orientar livremente para se alinhar ao campo elétrico, contribuindo com menor intensidade para a polarização do dielétrico. Deve-se a essa alta correlação entre permissividade elétrica e a quantidade de água presente no material o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos para determinação rápida e não destrutiva do teor de água de grãos.

Para dado valor de frequência, a permissividade aumenta com o aumento do teor de água. O fator de perda dielétrica apresenta comportamento menos previsível que a permissividade e pode aumentar ou diminuir em função do teor de água, dependendo tanto do tipo de produto quanto da frequência. Para determinados valores de frequência, o valor de ϵ'' para amostras com baixo teor de água é maior que o daquelas mais úmidas. No entanto, as variações nos valores das propriedades dielétricas são geralmente maiores quanto menores as frequências de oscilação do campo (Nelson, 1982; Mohsenin, 1984).

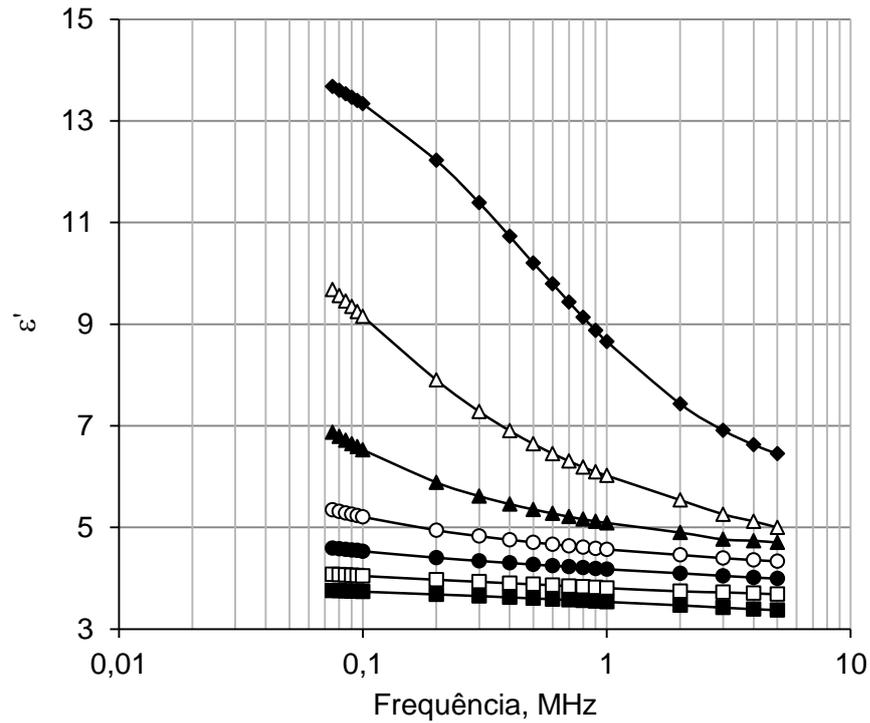
De acordo com Nelson (1994), com exceção de alguns materiais que não absorvem energia quando submetidos a campos elétricos com frequências além da faixa de micro-ondas, as propriedades dielétricas da maioria dos materiais variam consideravelmente com a frequência de oscilação dos campos elétricos aplicados. A influência da frequência nas propriedades dielétricas é exercida em função da polarização das moléculas que apresentam momento dipolar permanente, que tendem a mudar sua orientação quando submetidas a um campo elétrico alternado. Nesse caso, quanto menor a frequência, maior o tempo disponível para a reorientação dos dipolos, o que contribui para aumentar a capacitância de um capacitor contendo material granular úmido. Ao contrário, quando a frequência é elevada, não há tempo disponível para que os dipolos se alinhem com o campo, deixando de colaborar com a polarização do dielétrico.

A variação de ε' e ε'' em função do teor de água e da frequência foi determinada experimentalmente para diversos tipos de produtos agrícolas granulares, tanto em radiofrequências quanto em micro-ondas. O perfil de variação é semelhante para os mais diversos produtos. Apresentam-se, nas Figuras 8A e 8B as variações de ε' e ε'' , respectivamente, obtidas por Moura et al. (2016) para grãos de sorgo do híbrido CMSXS 769, para valores similares de massa específica aparente. As curvas mostradas nessas figuras demonstram que os valores de ε' e ε'' são altamente dependentes dos valores de teor de água e da frequência do campo.

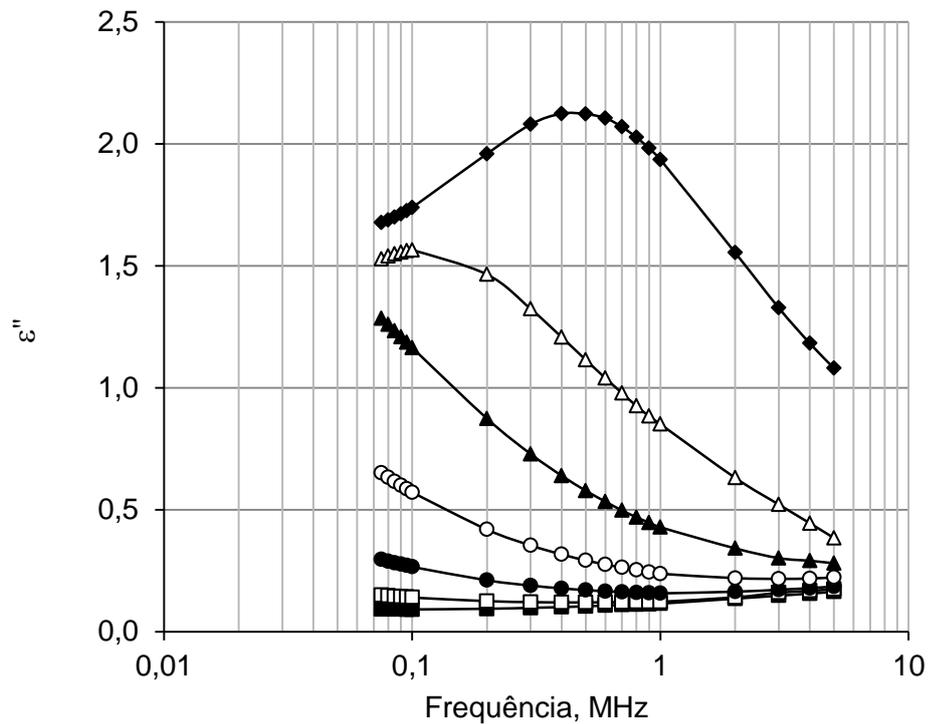
2.3.5.2. Massa específica aparente

A permissividade elétrica relativa do ar ε'_{ar} é igual a 1,0, ou seja, em termos práticos, o ar é considerado um meio translúcido às ondas eletromagnéticas sob frequências alternadas. Portanto, a quantidade de ar presente nos espaços intergranulares apenas altera a massa específica aparente do produto e o mesmo ocorre com as suas propriedades dielétricas (Schiffmann, 2006).

Na realidade, o efeito da massa específica aparente sobre as propriedades dielétricas é observado em função do grau de compactação dos grãos no interior do sensor capacitivo. Como o sistema de medição avalia a quantidade de água presente em determinado volume da amostra, um maior grau de compactação dos grãos entre os eletrodos, para um mesmo teor de água, seria interpretado como umidade adicional, resultando em um valor maior que o real. Manter constante a massa específica aparente de uma amostra de grãos durante a determinação do teor de água em uma unidade de secagem e armazenamento é um problema de difícil solução; sendo assim, uma alternativa viável é a utilização de funções dielétricas que sejam independentes da massa específica aparente (Kraszewski e Nelson, 1994).



A



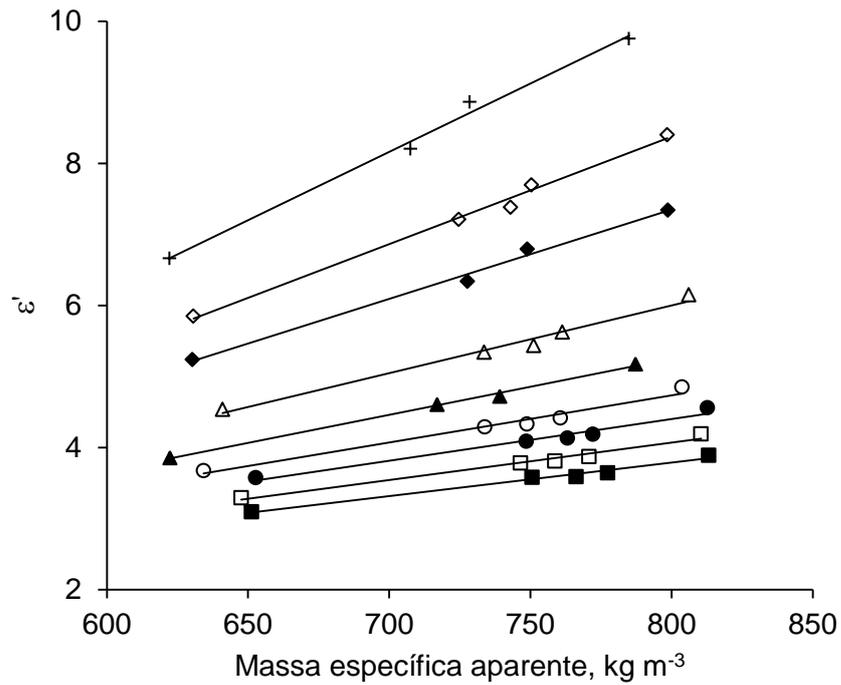
B

Figura 8. Variação de ε' (A) e ε'' (B) 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 ± 1 °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}). Fonte: Moura et al. (2016).

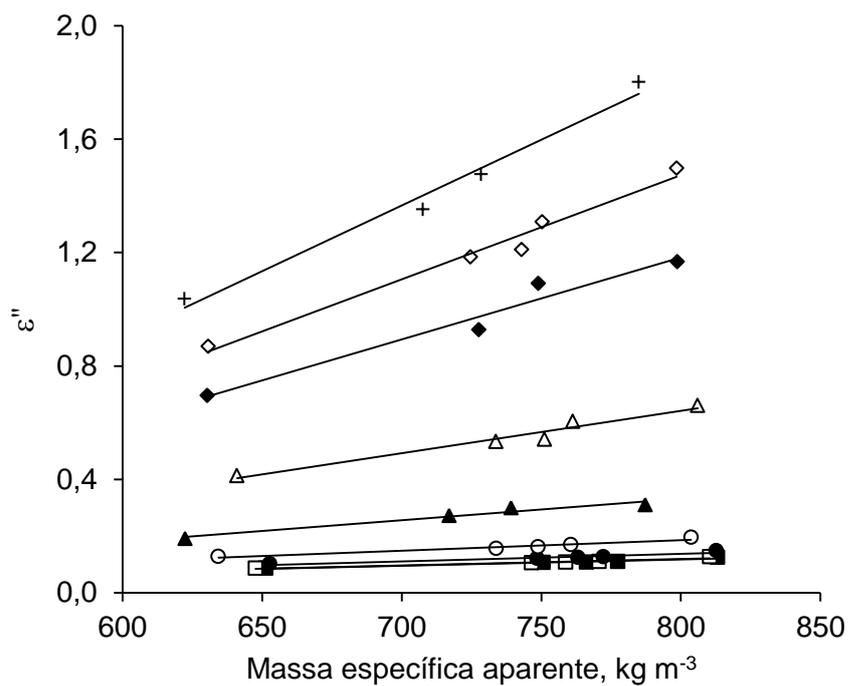
A variação de ε' e ε'' em função da massa específica aparente também foi determinada para diversos tipos de produtos agrícolas granulares, para diferentes intervalos de frequência (Trabelsi, et al., 1997a; Berbert et al., 2001, 2002b; Kim et al., 2003; Soares, 2014). Observam-se, em geral, aumentos lineares de ε' e ε'' em função de aumentos no valor de ρ , para amostras com o mesmo teor de água. Apresentam-se, nas Figuras 9A e 9B, as variações de ε' e ε'' , respectivamente, em função da massa específica aparente, a 1 MHz, obtidas por Moura et al. (2016) para grãos de sorgo do híbrido BRS 310. Observa-se, nessas figuras, que os coeficientes das retas que representam as funções $\varepsilon' = f(\rho)$ e $\varepsilon'' = f(\rho)$ aumentam com o teor de água, evidenciando que a influência que a massa específica exerce sobre as propriedades dielétricas é intensificada pela quantidade de água presente na amostra.

2.3.5.3. Temperatura

Um aumento na temperatura modifica o estado energético dos dipolos da molécula de água, dando-lhes maior liberdade para oscilar com o campo elétrico. Isto resulta no aumento da polarização do meio e nas perdas na forma de calor (Trabelsi e Nelson, 2006). Com o aumento da temperatura, o tempo de relaxação diminui e o pico do fator de perda se deslocará para frequências mais altas. Assim, em uma região de dispersão, a permissividade elétrica relativa aumentará com o aumento da temperatura, enquanto o fator de perda pode aumentar ou não, dependendo da frequência de medição ser mais alta ou mais baixa que a frequência de relaxação (Nelson, 1994).



A



B

Figura 9. Variação de ϵ' (A) e de ϵ'' (B) de grãos de sorgo BRS 310, a 1 MHz, em função da massa específica aparente, para valores indicados de teor de água, a 22 ± 1 °C e $58 \pm 5\%$ de umidade relativa. \blacksquare , 7,0%; \square , 9,1%; \bullet , 11,1%; \circ , 12,7%; \blacktriangle , 14,5%; \triangle , 16,9%; \blacklozenge , 19,7%; \diamond , 21%; $+$, 23,1%. Fonte: Moura et al. (2016).

Wang et al. (2013) observaram que, para noz macadâmia, tanto os valores de ε' quanto os de ε'' aumentaram significativamente em função do aumento da temperatura (25 a 100 °C), para teores de água entre 3% e 24% b.u. e para frequências no intervalo entre 10 e 100 MHz. Comportamento semelhante foi verificado em amêndoas, de 20 a 90 °C e de 6% a 36% b.u. (Gao et al. 2012), em farinhas de grão de bico, de ervilha, de lentilha e de soja (Guo et al., 2010) e de grãos de milho, de 4 a 45 °C, de 10% a 17% b.u., a 12,3 GHz (Trabelsi et al., 1997a).

2.3.5.4. Cultivar

Embora a composição química de grãos de diferentes cultivares de uma mesma espécie possa variar ligeiramente, é improvável que essa variação influencie significativamente suas propriedades dielétricas, uma vez que a maioria dos compostos orgânicos é apolar. Sendo assim, acredita-se que o efeito da cultivar deva-se, na realidade, às diferenças nas propriedades físicas dos grãos, principalmente sua forma e dimensões. De acordo com Kupfer (1996), em frequências elevadas, o tamanho médio dos grãos de uma amostra afeta o grau de absorção e dispersão das ondas do campo eletromagnético, influenciando assim suas propriedades dielétricas.

Tendo em vista o fato de os grãos serem materiais não homogêneos e considerando que os cálculos envolvidos na determinação das propriedades dielétricas são geralmente baseados em materiais homogêneos, as propriedades dielétricas de matérias granulares podem variar em função do espaçamento entre os eletrodos de um sensor capacitivo. Quando as dimensões dos grãos, e conseqüentemente, as dimensões dos espaços intergranulares representam frações consideráveis desse espaçamento, a não homogeneidade do dielétrico torna-se significativa. Desse modo, a permissividade elétrica relativa determinada com pequeno espaçamento entre eletrodos é menor que aquela obtida quando o espaçamento é maior (Nelson, 1982).

Moura et al. (2016) determinaram as propriedades dielétricas de quatro híbridos de sorgo e verificaram que as diferenças nos valores de ε' e ε'' estavam associadas às dimensões dos grãos. Para valores similares de ρ , os valores

medidos de capacitância e condutância foram maiores para grãos de maiores dimensões, aumentando-se assim tanto ε' quanto ε'' . Apresenta-se, na Figura 10, a variação de ε' , em função da frequência, para quatro híbridos de sorgo com valores próximos de massa específica aparente ($745 \pm 5 \text{ kg m}^{-3}$). Os maiores valores de ε' foram obtidos com grãos dos híbridos BRS 655 e CMSXS 769, aqueles com maiores dimensões, e os menores com aqueles dos híbridos BRS 308 e BRS 310. As curvas apresentadas na Figura 10 evidenciam que o projeto de medidores de teor de água de grãos empregando o método capacitivo, certamente deve contemplar curvas de calibração diferentes para os diversos grupos de cultivares/híbridos de grãos.

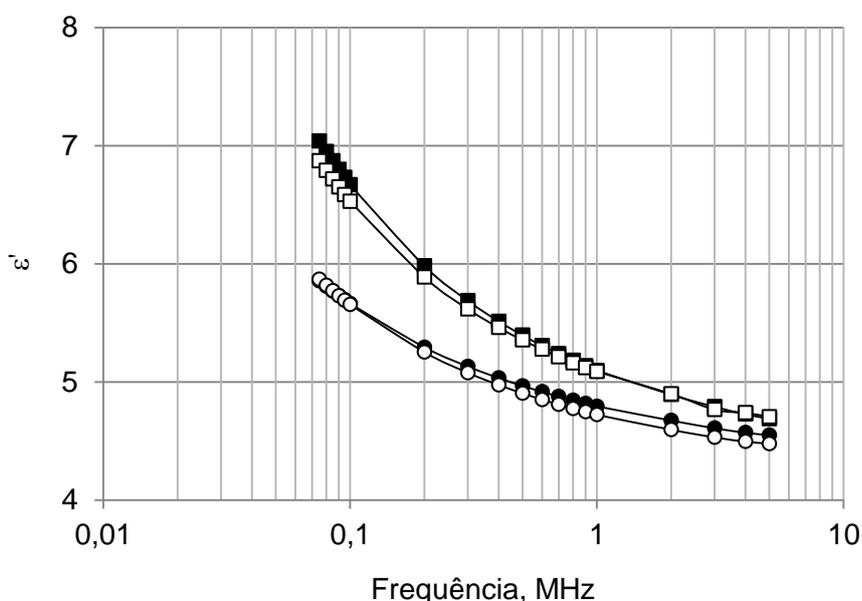


Figura 10. Variação da permissividade elétrica relativa ε' de grãos de quatro híbridos de sorgo, com teor de água de 15%, a 22 °C e 65% de umidade relativa, para valores indicados de ρ . ○, BRS 310 (739 kg m^{-3}); ●, BRS 308 (748 kg m^{-3}); □, CMSXS 769 (750 kg m^{-3}); ■, BRS 655 (741 kg m^{-3}). Fonte: Moura et al. (2016).

2.3.5.5. Composição química do material

Apesar de se esperar que a composição química dos grãos, além da água, tenha influência sobre suas propriedades dielétricas, esse assunto ainda

não foi extensivamente estudado. Nelson (1965) avaliou nove lotes de trigo, com teores de proteína entre 9,7 e 15,3%, e não observou qualquer correlação entre as propriedades dielétricas e o teor de proteínas. Nelson e Stetson (1976) também não encontraram relação entre os teores de proteína, óleo e cinzas e as propriedades dielétricas do trigo vermelho duro de inverno.

Observa-se que a composição química do material influencia suas propriedades dielétricas principalmente em função da presença de sais dissolvidos. Peng et al. (2013) destacaram que os níveis de sais presentes em amostras de tecidos de tomates aumentaram significativamente suas propriedades dielétricas. Este aumento nos valores de ϵ' e ϵ'' pode ser explicado pelo aumento na condutividade iônica da amostra devido à concentração de sais dissolvidos.

Nelson et al. (2006) avaliaram as propriedades dielétricas de melão, sob diferentes faixas de frequências, correlacionando-as à qualidade e ao grau de maturidade dos frutos. Observaram que a medição do teor de sólidos solúveis, principalmente açúcares, continua sendo o melhor critério para avaliação da qualidade do fruto.

2.3.6. Modelos dielétricos para estimativa do teor de água de grãos e sementes independente da massa específica aparente

2.3.6.1. Modelo de Kraszewski e Kulinski (1976)

O método desenvolvido por Kraszewski e Kulinski (1976) baseia-se na medição de dois parâmetros dielétricos, ϵ' e ϵ'' , em uma única frequência de oscilação do campo elétrico. Empregou-se a definição de teor de água de grãos dada pela Eq. (1) como ponto de partida para derivar um modelo de calibração que permitisse estimar o teor de água de materiais granulares em frequências de micro-ondas.

Alterações na capacitância de um sensor que contenha uma amostra úmida de grãos, independente da frequência de oscilação do campo elétrico aplicado, são proporcionais à concentração volumétrica de água ζ e apenas minimamente à massa de matéria seca da amostra (Kraszewski, 1988). De

acordo com Kraszewski e Nelson (1991), se existir uma elevada correlação entre o valor de ζ e o parâmetro elétrico medido, é evidente, pela Eq. (2), que uma estimativa acurada do teor de água, u , requer que se conheça a massa específica aparente ρ da amostra. Qualquer variação no valor de ρ , para um mesmo volume e teor de água da amostra, será interpretada pelo circuito elétrico como uma variação na concentração volumétrica de água ζ , o que resultará em erro de medição. Desta forma, manter constante a massa ou a massa específica aparente da amostra no elemento sensor é a única maneira de evitar o efeito de ρ durante os procedimentos de calibração, assim como durante as medições do teor de água propriamente ditas. Essa é a razão pela qual a maioria dos medidores de teor de água que empregam sensores capacitivos opera com amostras de massa constante. Essas exigências são difíceis de ser atendidas na medição on-line do teor de água de uma coluna de material granular em movimento. Tentativas de reduzir para limites aceitáveis as flutuações de massa específica aparente ou do fluxo de massa de uma coluna de grãos em movimento, como a vibração da amostra durante a medição, não produziram resultados satisfatórios em termos de acurácia na estimativa do teor de água do produto. Kraszewski e Kulinski (1976) usaram as seguintes funções para isolar os efeitos dos parâmetros dielétricos da água daqueles da massa de matéria seca durante a medição do teor de água:

$$\varepsilon' = f_1(M_a, M_{ms}) \quad (15)$$

$$\varepsilon'' = f_2(M_a, M_{ms}) \quad (16)$$

Resolvendo-se as duas equações por separação de variáveis, as massas de água e de matéria seca podem ser expressas da seguinte forma:

$$M_a = f_3(\varepsilon', \varepsilon'') \quad (17)$$

$$M_{ms} = f_4(\varepsilon', \varepsilon'') \quad (18)$$

Sendo assim, substituindo-se essas expressões analíticas na Eq. (1), que define o teor de água e empregando-se a definição teor de água em porcentagem base úmida, dado por $U = 100u$, obtém-se uma expressão para a estimativa do

teor de água que contém apenas os parâmetros dielétricos da amostra medidos experimentalmente (Eq. 19). O desempenho da Eq. (19) na estimativa do teor de água de diversos produtos é mostrado na Tabela 3. Os erros padrão de calibração (EPC) e de predição (EPP) são calculados por equações, que envolvem a diferença entre valores calculados e estimados de teor de água, em % b.u. Sendo assim, os valores de EPC e EPP são dados em “ponto percentual de teor de água”.

$$U = \left[\frac{f_3(\varepsilon', \varepsilon'')}{f_3(\varepsilon', \varepsilon'') + f_4(\varepsilon', \varepsilon'')} \right] 100 \quad (19)$$

Tabela 3. Desempenho do modelo dielétrico proposto por Kraszewski e Kulinski (1976) na estimativa do teor de água de diversos produtos agrícolas granulares, para diferentes valores de frequência, teor de água, massa específica aparente e temperatura.

Produto	Freq.	U (% b.u.)	ρ (kg m ⁻³)	T (°C)	ξ (%)	EPC	EPP	Fonte
Café	5,0 MHz	11,0 a 23,0	326 a 455	21,0	–	1,70	–	1
Feijão	5,0 MHz	11,5 a 20,6	756 a 850	20,0	–	1,30	–	2
Milho	9,4 GHz	9,4 a 24,6	650 a 850	–	0,135	–	0,29	3
Sorgo	5,0 MHz	13,0 a 23,0	575 a 818	22,5	-0,004	1,20	–	4
Trigo	9,0 GHz	10,7 a 20,4	650 a 800	–	-0,097	–	0,26	5
Trigo	5,0 MHz	13,0 a 22,0	670 a 860	21 a 24	–	0,50	0,27	6

Fontes: 1. Berbert et al. (2007b); 2. Berbert et al. (2004a); 3. Kraszewski e Nelson (1994); 4. Moura et al. (2013); 5. Kraszewski e Nelson (1991); 6. Berbert e Stenning (1996).

2.3.6.2. Modelo de Meyer e Schilz (1980)

O método desenvolvido por Meyer e Schilz (1980) também se baseia na medição simultânea de dois parâmetros dielétricos, ε' e ε'' , em uma única frequência de oscilação do campo, para determinar o teor de água de produtos sólidos granulares. Contudo, ao contrário do método proposto por Kraszewski e Kulinski (1976), utiliza procedimentos mais aprimorados para reduzir o efeito da massa específica aparente no resultado obtido. O método foi desenvolvido a partir da análise dos efeitos da interação de ondas eletromagnéticas com amostras de materiais sólidos granulares contendo água. Esta interação foi descrita utilizando-

se a equação que define a permissividade elétrica complexa relativa, ou seja, $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$.

Considerando-se que um produto sólido úmido é constituído por duas fases distintas: matéria seca e água. A matéria seca, neste contexto, é considerada material homogêneo, pois seu efeito sobre o campo elétrico é apenas residual, quando comparado com aquele produzido pela água (Kaatze, 1996). Mantendo-se a temperatura e a frequência constantes, a permissividade complexa de um produto granular úmido varia em função de sua massa específica aparente, ρ , e teor de água, U , de acordo com a seguinte equação:

$$\varepsilon = \varepsilon(\rho, U) = \varepsilon'(\rho, U) - j\varepsilon''(\rho, U) \quad (20)$$

Valores obtidos experimentalmente por Meyer e Schilz (1980) utilizando produtos como tabaco, café solúvel, ração para peixes, grãos de trigo e de cevada, revelaram que a relação dos parâmetros dielétricos complexos com a massa específica aparente e o teor de água poderia ser representada por duas funções independentes, desde que se usasse o valor de $(\varepsilon'-1)$ ao invés do valor inalterado de ε' . Desta forma, tem-se:

$$(\varepsilon' - 1) = f_1(U) f_2(\rho) \quad (21)$$

$$\varepsilon'' = f_3(U) f_4(\rho) \quad (22)$$

Partindo-se do pressuposto que as funções envolvendo a massa específica aparente, f_2 e f_4 , sejam lineares, a razão entre elas é uma constante e seria razoável supor-se que o valor dado por $[(\varepsilon'-1)/\varepsilon'']$ seria uma quantidade independente da massa específica aparente, ou seja,

$$\frac{\varepsilon'-1}{\varepsilon''} = \frac{f_1(U) f_2(\rho)}{f_3(U) f_4(\rho)} \cong \frac{f_1(U)}{f_3(U)} (\text{constante}) = f_5(U) \quad (23)$$

Conforme observado na Eq. (23) a função $f_5(U)$ e, conseqüentemente, a razão $[(\varepsilon'-1)/\varepsilon'']$, é uma propriedade específica do material. Esta propriedade depende unicamente do teor de água, da temperatura e da frequência do campo

elétrico, sendo independente da massa específica aparente da amostra. O desempenho da Eq. (23) na estimativa do teor de água de diversos produtos é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Desempenho do modelo dielétrico proposto por Meyer e Schilz (1980) na estimativa do teor de água de diversos produtos agrícolas granulares, para diferentes valores de frequência, teor de água, massa específica aparente e temperatura.

Produto	Frequência	U (% b.u.)	ρ (kg m ⁻³)	T (°C)	EPC	EPP	Fonte
Alfafa	9,06 GHz	12,0 a 73,0	139 a 716	20	1,11	1,73	1
Amendoim	10 GHz	4,9 a 21,6	537 a 687	1 a 38	–	0,70	2
Café	0,1 e 1,0 MHz	11,0 a 23,0	326 a 455	21	1,20	–	3
Feijão	5,0 MHz	11,5 a 15,5	756 a 854	20	0,60	–	4
Feijão	85 kHz	16,7 a 20,6	756 a 854	20	0,70	–	4
Soja	10,0 GHz	7,1 a 20,3	710 a 820	22 a 24	0,33	–	5
Trigo	11,3 GHz	10,6 a 18,2	720 a 879	24	0,18	–	6
Trigo	1,0 MHz	10,9 a 19,0	670 a 860	21 a 24	0,30	0,40	7

Fontes: 1. Shrestha et al. (2005); 2. Trabelsi et al. (2009); 3. Berbert et al. (2008); 4. Berbert et al. (2004a); 5. Trabelsi e Nelson (2004); 6. Kraszewski et al. (1998); 7. Berbert e Stenning (1996).

2.3.6.3. Modelo de Kent e Meyer (1982)

Kent e Meyer (1982) verificaram que para materiais que apresentavam valores reduzidos de perda dielétrica, ou seja, quando $[(\epsilon'-1)/\epsilon''] \ll 0,1$, o valor da razão K, Eq. 24, era menos sensível às variações de massa específica aparente das amostras que a função inalterada de Meyer e Schilz, $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$.

$$K = \frac{\epsilon'-1}{\epsilon''} \frac{2\sqrt{\epsilon'}}{1+\sqrt{\epsilon'}} \quad (24)$$

A análise da Eq. 24 permite verificar que, para os valores possíveis de ϵ' , ou seja, $1 \leq \epsilon' < \infty$, o fator $(2\sqrt{\epsilon'})/(1+\sqrt{\epsilon'})$ varia no intervalo entre 1,0 e 0,5. Portanto, ao aumento no valor de ϵ' de 2,0 para 3,0, corresponde uma mudança no valor do fator de 0,85 para 0,79. Para determinados produtos só se consegue esse nível de variação no valor de ϵ' quando se duplica a massa específica aparente. Sendo assim, Kent e Meyer (1982) concluíram que a função K é

aproximadamente igual à função inalterada de Meyer e Schilz (1980) e, portanto, também independe do valor de ρ . O desempenho da Eq. (24) na estimativa do teor de água de diversos produtos é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5. Desempenho do modelo dielétrico proposto por Kent e Meyer (1982) na estimativa do teor de água de diversos produtos agrícolas granulares, para diferentes valores de frequência, teor de água, massa específica aparente e temperatura.

Produto	Freq.	U (% b.u.)	ρ (kg m ⁻³)	T (°C)	SEC	SEP	Fonte
Alfafa	9,06 GHz	12,0 a 73,0	139 a 716	20	0,80	1,92	1
Feijão	2,0 e 5,0 MHz	11,5 a 15,5	756 a 854	20	0,50	–	2
Feijão	85 e 100 kHz	16,7 a 20,6	756 a 854	20	0,50	–	2
Trigo	0,5 e 1,0 MHz	11,0 a 22,0	700 a 860	21 a 24	0,60	0,60	3

Fontes: 1. Shrestha (2005); 2. Berbert et al. (2004a); 3. Berbert e Stenning (1996).

2.3.6.4. Modelo de McFarlane (1987)

O método desenvolvido por McFarlane (1987) fundamenta-se na medição de um único parâmetro dielétrico (ϵ') em duas frequências de oscilação do campo (f_1 e f_2). McFarlane (1987) baseou-se em trabalho prévio de Dzhemella e Pustynnikov (1965) para desenvolver um método capaz de reduzir os efeitos da massa específica aparente no grau de acurácia da estimativa do teor de água de grãos de trigo. O método consiste na resolução de equações que correlacionam a permissividade elétrica relativa (ϵ') do produto, medida simultaneamente em duas frequências (f_1 e f_2), ao teor de água (U, % b.u.) e à massa específica aparente do produto (ρ , kg m⁻³). Para sementes de trigo, McFarlane (1987) obteve as seguintes equações:

$$\epsilon'_{(0,1 \text{ MHz})} = 0,559 U + 0,00698 \rho - 9,27 \quad (25)$$

$$\epsilon'_{(10 \text{ MHz})} = 0,144 U + 0,00506 \rho - 2,29 \quad (26)$$

Eliminando ρ e rearranjando a equação de forma a ter U como variável dependente, obteve-se a seguinte equação para estimativa do teor de água:

$$U = 2,78 \varepsilon'_{0,1 \text{ MHz}} - 3,83 \varepsilon'_{10 \text{ MHz}} + 17,00 \quad (27)$$

A Eq. (27) permitiu estimar o teor de água do trigo com desvio padrão e erro máximo de 0,6 e 1,0, respectivamente. O desempenho da Eq. (27) na estimativa do teor de água de diversos produtos é mostrado na Tabela 6.

Tabela 6. Desempenho do modelo dielétrico proposto por McFarlane (1987) na estimativa do teor de água de diversos produtos agrícolas granulares, para diferentes valores de frequência, teor de água, massa específica aparente e temperatura.

Produto	Freq.	U (% b.u.)	ρ (kg m ⁻³)	T (°C)	SEC	SEP	Fonte
Café	0,5 e 5 MHz	11,0 a 23,0	326 a 455	21	1,7	1,8	1
Feijão	0,5 e 5,0 MHz	11,5 a 20,6	756 a 854	20	1,2	–	2
Sorgo	0,075 e 5 MHz	13,0 a 23,0	575 a 818	22,5	2,2	–	3
Trigo	0,5 e 5,0 MHz	13,0 a 22,1	660 a 860	21 a 24	0,7	1,1	4

Fontes: 1. Berbert et al. (2007b); 2. Berbert et al. (2004a); 3. Moura et al. (2013); 4. Berbert e Stenning (1996).

2.3.6.5. Modelo de Powell et al. (1988)

Nelson (1994) verificou que tanto ε' quanto ε'' podem ser representados por funções lineares, tendo ρ como variável independente, para um amplo intervalo de massa específica aparente. Demonstrou-se que $(\varepsilon')^{1/3}$ e $\sqrt{(\varepsilon'' + p)}$, em que p é uma constante de pequeno valor e que depende do material, também eram funções lineares da massa específica aparente. Observou-se que no plano complexo representado por $(\varepsilon')^{1/3} = f(\sqrt{(\varepsilon'' + p)})$, o lugar geométrico de $(\varepsilon')^{1/3}$, em função da massa específica aparente, ρ , também é representado por uma reta que passa pelo ponto de coordenadas (1,0) para massa específica igual a zero. Teoricamente, este é o ponto que representaria os parâmetros dielétricos relativos ao vácuo, ou seja, $\varepsilon' = 1$ e $\varepsilon'' = 0$ (Kraus e Carver, 1973). Powell et al. (1988) utilizando os resultados obtidos por Nelson (1984), derivaram uma nova função, a 10,5 GHz, Eq. (28) e que seria independente da massa específica aparente de determinado produto granular para intervalos mais amplos de ρ que aqueles observados para a função inalterada de Meyer e Schilz (1980). O modelo de Powell et al. (1988) foi empregado com relativo sucesso na determinação do teor

de água de trigo (Kraszewski et al., 1998) e alfafa (Shrestha et al., 2005) em frequências de micro-ondas, 11,3 e 9,06 GHz, respectivamente, mas mostrou-se ineficaz para grãos de trigo e feijão, em radiofrequências (Berbert e Stenning, 1996; Berbert et al., 2004a).

$$P = \frac{\sqrt[3]{\varepsilon'} - 1}{\sqrt{\varepsilon''}} \quad (28)$$

2.3.6.6. Modelo de Lawrence e Nelson (1993)

O modelo desenvolvido por Lawrence e Nelson (1993) preconiza a medição de dois parâmetros dielétricos (ε' e ε'') em duas frequências (f_1 e f_2). Stetson e Nelson (1972) sugeriram que em função da variação irregular do fator de perda dielétrica em baixas frequências de oscilação do campo, o emprego de ε'' como variável dependente não resultaria em valores acurados do teor de água de grãos. Nelson (1977) afirmou que a predominância de medidores de teor de água que se baseiam apenas na determinação de ε' se deve ao fato de a permissividade elétrica exibir menor variabilidade entre diferentes lotes de grãos do que o fator de perda dielétrica. Lawrence e Nelson (1993) mostraram que devido à linearidade existente entre o $\ln(\varepsilon'')$ e a massa de água contida em grãos de trigo, a 1 MHz, a inserção de $\ln(\varepsilon'')$ como covariável melhoraria o desempenho da equação de predição. O desempenho da Eq. (29) na estimativa do teor de água de diversos produtos é mostrado na Tabela 7.

$$U = f [\varepsilon'_{f1}, \ln(\varepsilon''_{f1}), \varepsilon'_{f2}, \ln(\varepsilon''_{f2})] \quad (29)$$

Tabela 7. Desempenho do modelo dielétrico proposto por Lawrence e Nelson (1993) na estimativa do teor de água de diversos produtos agrícolas granulares, para diferentes valores de frequência, teor de água, massa específica aparente e temperatura.

Produto	Freq.	U (% b.u.)	ρ (kg m ⁻³)	T (°C)	SEC	SEP	Fonte
Café	0,5 e 5,0 MHz	11,0 a 23,0	326 a 455	21	1,30	1,20	1
Feijão	0,5 e 5,0 MHz	11,5 a 20,6	756 a 854	20	1,00	–	2
Sorgo	1,0 e 5,0 MHz	13,0 a 23,0	575 a 818	22,5	1,10	–	3
Trigo	1,0 e 10,0 MHz	11,0 a 22,0	650 a 850	24	0,62	0,50	4
Trigo	0,5 e 5,0 MHz	13,0 a 22,0	625 a 891	21 a 24	0,40	0,50	5

Fontes: 1. Berbert et al. (2007b); 2. Berbert et al. (2004a); 3. Moura et al. (2013); 4. Lawrence e Nelson (1993); 5. Berbert e Stenning (1996).

2.3.6.7. Modelo de Trabelsi et al. (1997b)

O ponto de partida para o desenvolvimento de um modelo dielétrico que seja independente de ρ para a estimativa on-line do teor de água de produtos granulares, de acordo com o método proposto por Trabelsi et al. (1997b), consiste na derivação de equações, para cada valor de frequência, que permita correlacionar a massa específica aparente dos grãos e seus parâmetros dielétricos da seguinte forma:

$$\rho = \frac{1}{k} \left(\frac{a_f \varepsilon' - \varepsilon''}{a_f} \right) \quad (30)$$

Em que a_f e k representam a declividade e o ponto em que as retas obtidas pela equação apresentada a seguir interceptam o eixo das abscissas no plano da permissividade complexa relativa, $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$, ou seja, no *locus* representado pelos pontos cujas coordenadas são $[(\varepsilon''/\rho), (\varepsilon'/\rho)]$.

$$\frac{\varepsilon''}{\rho} = a_f \left(\frac{\varepsilon'}{\rho} - k \right) \quad (31)$$

De acordo com von Hippel (1966), citado por Trabelsi et al. (2000), a tangente do ângulo de perdas dielétricas, $\tan \delta$, é o parâmetro que melhor descreve a relação entre as energias armazenada e dissipada em dielétricos.

Quando grãos úmidos de determinado produto agrícola são submetidos a campos eletromagnéticos de alta frequência, o componente preponderante em relação à energia dissipada é a água presente no material. Sendo assim, um modelo dielétrico independente de ρ para o cálculo do teor de água e que seja baseado na tangente do ângulo de perdas, se constituiria na melhor solução, sob o ponto de vista energético, para descrever a interação entre as ondas eletromagnéticas e o produto granular. De fato, para sementes de trigo a 24 °C e frequência de oscilação de 14,2 GHz, Trabelsi et al. (2000) verificaram que a relação entre $\text{tg } \delta$ e o teor de água era representada por uma função linear positiva. No entanto, observou-se também que era graficamente visível o efeito da massa específica aparente sobre o valor de $\text{tg } \delta$, para cada valor de teor de água. Para reduzir esse efeito, definiu-se um modelo dielétrico Ψ representado pela razão entre $\text{tg } \delta$ e o valor de ρ dado pela Eq. (30) e representado pela seguinte equação:

$$\Psi = \frac{ka_f}{a_f \varepsilon' - \varepsilon''} \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right) \quad (32)$$

Observa-se que Ψ é definida apenas em função de parâmetros dielétricos do material, da constante k e de um fator, a_f , que depende da frequência utilizada na medição, sendo independente do teor de água, da temperatura e da massa específica aparente. Sob o ponto de vista da engenharia de desenvolvimento de protótipos de medidores, quanto menor o número de fatores extrínsecos envolvidos na equação de calibração, mais fácil será o processo de calibração do equipamento de medição. A Eq. 32 indica que para dado material e determinada frequência, o produto $(k.a_f)$ também é uma constante e pode ser omitido do modelo. Sendo assim e de acordo com Trabelsi et al. (2000), a função Ψ pode ser simplificada da seguinte maneira (Eq. 33), quando for utilizada para calibrar um sistema de medição operando em uma única frequência. Verifica-se que, em sua forma simplificada, a função Λ necessita de apenas um único parâmetro extrínseco para ser utilizada, ou seja, o fator a_f .

$$\Lambda = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' (a_f \varepsilon' - \varepsilon'')} \quad (33)$$

Para correlacionar o teor de água à função Λ , basta utilizar-se a análise de regressão linear para obter-se uma equação do tipo apresentado a seguir (Eq. 34), em que α representa a declividade da reta e β o ponto em que a reta intercepta o eixo das ordenadas. Considerando que a relação entre Λ e U é dada por uma função quadrática, $\sqrt{\Lambda}$ é uma variável mais apropriada para a obtenção de uma função linear, obtendo-se então $\sqrt{\Lambda} = \alpha U + \beta$ (Trabelsi et al., 1998). O desempenho da Eq. (34) na estimativa do teor de água de diversos produtos é mostrado na Tabela 8.

$$\Lambda = \alpha U + \beta \quad (34)$$

Tabela 8. Desempenho do modelo dielétrico proposto por Trabelsi et al. (1997b) na estimativa do teor de água de diversos produtos agrícolas granulares, para diferentes valores de frequência, teor de água, massa específica aparente e temperatura.

Produto	Freq.	U (% b.u.)	ρ (kg m ⁻³)	T (°C)	SEC	SEP	Fonte
Amendoim	10 GHz	4,9 a 21,6	537 a 687	1 a 38	–	0,80	1
Feijão	75 kHz	13,4 a 19,5	756 a 854	20	0,60	–	2
Milho	14,2 GHz	9,0 a 19,0	695 a 830	14 a 34	–	0,47	3
Soja	10,0 GHz	7,1 a 20,3	710 a 820	22 a 24	0,35	–	4

Fontes: 1. Trabelsi et al. (2009); 2. (Berbert et al., 2004b); 3. Trabelsi et al. (1998b); 4. Trabelsi e Nelson (2004).

2.3.6.8. Modelo de Zhang e Okamura (1999)

Zhang e Okamura (1999) desenvolveram um modelo dielétrico no qual o teor de água de folhas de chá é correlacionado à razão entre os valores de mudança de fase que ocorrem quando ondas eletromagnéticas em duas frequências de micro-ondas interagem simultaneamente com o material. De acordo com os autores, a mudança de fase é descrita pela seguinte equação:

$$\Delta\Phi \approx (\sqrt{\epsilon'} - 1) \cdot L \cdot 360 \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (35)$$

De acordo com a Eq. 35, a razão entre as mudanças de fase que ocorrem quando duas ondas de frequências f_1 e f_2 , sendo $f_2 > f_1$, interagem simultaneamente com o material, pode ser expressa pela equação abaixo:

$$\frac{\Delta\Phi_{f2}}{\Delta\Phi_{f1}} = \left(\frac{\sqrt{\varepsilon'_{f2}} - 1}{\sqrt{\varepsilon'_{f1}} - 1} \right) \left(\frac{\lambda_{f1}}{\lambda_{f2}} \right) \quad (36)$$

Considerando que a razão $(\lambda_{f1}/\lambda_{f2})$ é uma constante, Zhang e Okamura (1999) obtiveram uma nova função, denominada função Γ nesse trabalho, envolvendo parâmetros dielétricos que, teoricamente, seria independente da massa específica aparente das amostras no intervalo $200 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho \leq 800 \text{ kg m}^{-3}$. Além disso, a função é unívoca para teores de água entre 8 e 33%. Os autores não informaram os valores do erro padrão da estimativa e do erro máximo. Berbert et al. (2004a) avaliaram o desempenho da Eq. (37) para frequências de 75 kHz, 1 MHz e 5 MHz, na estimativa do teor de água de sementes de feijão a 20 °C e observaram que o EPC variou entre 0,4 e 0,7.

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon'_{f2}} - 1}{\sqrt{\varepsilon'_{f1}} - 1} \quad (37)$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguerreta, J., Iguaz, A., Arroqui, C., Vírseda, P. (2007) Effect of high temperature intermittent drying and tempering on rough rice quality. *Journal of Food Engineering*, 80: 611–618.
- 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.
- Almeida, M., Almeida, C.V. (2014) *Morfologia do caule de plantas com sementes*. Piracicaba – SP. ESALQ/USP, 155p.
- ASAE (1982). ASAE Standard (29th Edn.) S352.1. Moisture measurement – grain and seeds. St Joseph: American Society of Agricultural Engineers.
- Berbert, P.A. (1995) *On-line density-independent moisture content measurement of hard winter wheat using the capacitance method*. Thesis (PhD in Agricultural Engineering) – Cranfield University, Silsoe College, 212p.
- Berbert, P.A., Stenning, B. C. (1996) Analysis of density-independent equations for determination of moisture content of wheat in the radiofrequency range. *J. agric. Engng Res.*, 65: 275-286.
- Berbert, P.A., Queiroz, D.M., Sousa, E.F., Molina, M.A.B., Melo, E.C. (2001) Dielectric properties of parchment coffee. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80 (1): 65-80.
- Berbert, P.A., Melo, E.C., Queiroz, D.M., Sousa, E.F., Faroni, L.R.D. (2002a) Estimativa da massa específica aparente de sementes de trigo utilizando propriedades dielétricas. *Engenharia Agrícola*, 22 (3):444-451.

- Berbert, P.A., Queiroz, D.M., Melo, E.C. (2002b) Dielectric properties of common bean. *Biosystems Engineering*, 83 (4): 449-462.
- Berbert, P.A., Queiroz, D.M., Sousa, E.F., Viana, A.P., Detmann, E., Carlesso, V.O. (2004a) Avaliação de três modelos dielétricos derivados da função $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ na estimativa do teor de água de sementes de feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8 (1):92-101.
- Berbert, P.A., Queiroz, D.M., Sousa, E.F., Detmann, E., Viana, A.P., Dionello, R.G. (2004b) Adaptação da função dielétrica $\{\epsilon''/[\epsilon'(a_f \epsilon' - \epsilon'')]\}$ para determinação do teor de água em sementes de feijão por radiofrequências. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8 (2/3):266-273.
- Berbert, P.A., Molina, M.A.B., Viana, A.P., Carlesso, V.O., Oliveira, M.T.R. (2007a) Meyer and Schilz function to estimate common bean seed water content evaluated by radiofrequency. *Scientia Agrícola*, 64 (6): 569-574.
- Berbert, P.A., Molina, M.A.B., Carlesso, V.O., Oliveira, M.T.R. (2007b) Determinação do teor de água de sementes de café empregando o método da capacitância em radiofrequências. *Revista Brasileira de Sementes*, 29 (2):159-170.
- Berbert, P.A., Molina, M.B., Carlesso, V.O., Oliveira, M.R. (2008) Utilização de função dielétrica para estimar o teor de água de sementes de café. *Bragantia*, 67 (2):541-548.
- 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.
- Borém, A., Pimentel, L., Parella, R. (2014) Sorgo: do plantio a colheita. Viçosa – MG. Ed. UFV, 275p.
- Brasil (2000) Lei 9.973 de 29 de maio de 2000: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9973.htm em 05/03/16.
- Brasil (2009) Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.º 6, de 16 de fevereiro de 2009. Aprova o Regulamento Técnico do Arroz. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, v. 146, n. 33, p. 3-8, 17 fev. 2009. Seção 1.
- Brasil (2017) *Projeções do Agronegócio 2016/2017 a 2026/2027*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Política Agrícola. Brasília: Mapa/SPA, 125p.
- Breseghele, F., Moraes, O.P., Castro, E.M., Pereira, J.A., Utumi, M.M., Lopes, A.M., Cordeiro, A.C.C., Bassinello, P.Z., Fonseca, J.R., Prabhu, A.S., Peters, V., Soares, A.A. (2006) *BRS Sertaneja: cultivar precoce de arroz de terras altas*. Boletim Técnico n.º 133. Embrapa: Santo Antônio de Goiás, GO. 4p.

- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W. (1992) *Drying and storage of grains and oilseeds*. New York: Van Nostrand Reinhold, 450p.
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G. (2013) *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC, 8. ed., 817p.
- Carvalho, N.M., Nakagawa, J. (2012) *Sementes: ciência, tecnologia e produção*. 5.ed. Jaboticabal: FUNEP, 590p.
- Castro, A.P., Morais, O.P., Breseghello, F., Lobo, V.L.S., Guimarães, C.M., Bassinello, P.Z., Combari Filho, J.M., Santiago, C.M., Furtini, I.V., Torga, P.P., Utumi, M.M., Pereira, J.A., Cordeiro, A.C.C., Azevedo, R., Sousa, N.R.G., Soares, A.A., Radmann, V., Peters, V.J. (2014) *BRS Esmeralda: cultivar de arroz de terras altas com elevada produtividade e maior tolerância à seca*. Comunicado Técnico n°. 215. Embrapa Arroz e Feijão: Santo Antônio de Goiás, GO, 4p.
- Chen, C. (2003) Evaluation of air oven moisture content determination methods for rough Rice. *Biosystems Engineering*, 86 (4):447-457.
- Costa, J.C., Borges, J.A.R., Pires, L.F. (2013) Soil bulk density evaluated by gamma-ray attenuation: Analysis of system geometry. *Soil & Tillage Research*, 129: 23-31.
- Cutrim, V.A., Cordeiro, A.C.C., Lopes, A.M., Pereira, J.A., Fonseca, J.R., Rangel, P.H.N., Neto, S.A. (2008) *BRS Tropical: cultivar de arroz de ampla adaptação para as várzeas tropicais*. Comunicado Técnico n°. 163. Embrapa Arroz e Feijão: Santo Antônio de Goiás, GO, 4p.
- 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.
- Dong, R., Lu, Z., Liu, Z., Nishiyama, Y., Cao, W. (2009) Moisture distribution in a rice kernel during tempering drying. *Journal of Food Engineering*, 91: 126-132.
- Dzhemella, V.V., Pustynnikov, V.G. (1965) Two-parameter instrument for automatic measurement of moisture content in corn. *Instrument Construction*, 7: 32-34.
- Embrapa (2014) *Catálogo de cultivares de arroz*. Embrapa Arroz e Feijão: Santo Antônio de Goiás, GO, 11p.
- Embrapa (2018) Sistemas de produção – Arroz Terras Altas: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/index.htm> em 25/01/18. Página mantida Embrapa.
- Epagri (2012) *Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil*. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Itajaí: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 179p.

- FAO (2018) Base de dados agrícolas FAOSTAT: Cultivos Primários: Arroz Produção; <http://www.fao.org/faostat> em 22/01/18. Página mantida por *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Fonseca, J.R., Silva, J.G. (2006) Cultivo do arroz de terras altas no estado de Mato Grosso. Sistemas de Produção n.º 7: https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltasMatoGrosso/pos_colheita.htm em 20/06/16. Página mantida pela Embrapa.
- Fonseca, J.R., Cutrim, V.A., Gusmão, A.R.E., Faria, J.M. (2008) *Descritores Botânicos, Agronômicos e Fenológicos do Arroz (Oryza sativa L.)*. Série Documentos, n.º 226. Santo Antônio de Goiás – GO: Embrapa Arroz e Feijão, 28p.
- Funk, D.B., Gillay, Z., Meszaros, P. (2007) Unified moisture algorithm for improved RF dielectric grain moisture measurement. *Meas. Sci. Technol.*, 18: 1004-1015.
- Gao, M., Tang J., Johnson J.A., Wang, S. (2012). Dielectric properties of ground almond shells in the development of radio frequency and microwave pasteurization. *Journal of Food Engineering*, 112: 282-287.
- GRiSP (2013) *Rice almanac*. 4th ed. Global Rice Science Partnership. Los Baños: International Rice Research Institute, 283p.
- Guimarães, C.M., Fageria, N.K., Barbosa Filho, M.P. (2002) Como a planta do arroz se desenvolve – Arquivo do Agrônomo n.º 3. Encarte do *Informações Agronômicas*, 99 (setembro). 12p.
- Guo, W.C., Nelson, S.O., Trabelsi, S., Kays, S.J. (2007a) 10-1800 MHz dielectric properties of fresh apples during storage. *Journal of Food Engineering*, 83 (4): 562-569.
- Guo, W.C., Nelson, S.O., Trabelsi, S., Kays, S.J. (2007b) Dielectric properties of honeydew melons and correlation with quality. *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 41 (2): 44-54.
- Guo, W., Wang, S., Tiwari, G., Johnson, J.A., Tang, J. (2010) Temperature and moisture dependent dielectric properties of legume flour associated with dielectric heating. *LWT - Food Science and Technology*, 43 (2): 193-201.
- Guo, W., Zhu, X., Nelson, S.O., Yue, R., Liu, H., Liu, Y. (2011) Maturity effects on dielectric of apples from 10 to 4500 MHz. *LWT - Food Science and Technology*, 44 (2): 224-230.
- Hacihafizoğlu, O., Cihan, A., Kahveci, K. (2008) Mathematical modelling of drying of the layer rough rice. *Food and Bioproducts Processing*. 86: 268–275.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2009) *Fundamentos de física 3: eletromagnetismo*. Editora LTC. 395p.

- Harper, L. (2016) Natural history illustration. <http://www.lizzieharper.co.uk/gallery/Botanical/image/271/Rice> em 10/06/16. Página mantida por Lizzie Harper.
- IBGE (2018) Produção Agrícola Municipal: Culturas temporárias e permanentes - PAM: <http://www.ibge.gov.br> em 22/01/18. Página mantida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- ISTA (2010) Determination of moisture content. *In: International Seed Testing Association (org) International Rules for Seed Testing*. Bassersdorf: ISTA, p. 9-1 – 9-20.
- Jafari, F., Khalid, K., Daud, W.M., Yusoff, W., Hassan, J. (2010) The analysis and design of multi-layer microstrip moisture sensor for rice grain. *Biosystems Engineering*, 106:324-331.
- Kaatze, U. (1996) Microwave dielectric properties of water. *In: Kraszewski, A. (ed.) Microwave Aquametry*. New York: IEEE Press, p. 37-53.
- Kandala, C.V.K., Butts C.L. (2008) Design and performance of a capacitor sensor and impedance analyzer for nondestructive moisture content determination. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2:240-246.
- 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.
- Kent, M., Meyer, W. (1982) A density-independent microwave moisture meter for heterogeneous foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 1: 31-42.
- 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):72-77.
- 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 ASAE*, 46 (3): 861-867.
- Knipper, N.V. (1959) Use of high-frequency currents for grain drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 4 (4): 349-360.
- Kraszewski, A.W., 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.
- Kraszewski, A.W. (1988) Microwave monitoring of moisture content in grain – further considerations. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 23 (4): 236-246.
- 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 Agricultural Engineering Research*, 58 (1): 37-46.
- 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
- Kraus, J.D., Carver, K.R. (1973) *Electromagnetics*. 2nd ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 828p.
- 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, 313-327.
- Lawrence, K.C., Nelson, S.O. (1993) Radio-frequency density-independent moisture determination in wheat. *Transactions of the ASAE*, 36 (2):477-483.
- Lawrence, K.C., Funk, D.B., Windham, W.R. (2001) Dielectric moisture sensor for cereal grains and soybeans. *Transactions of the ASAE*, 44 (6):1691-1696.
- Lisovsky, V.V. (2007) Automatic control of moisture in agricultural products by methods of microwave aquametry. *Measurement Science and Technology*, 18 (4): 1016-1021
- Lizhi, H., Toyoda, K., Ihara, I. (2008) Dielectric properties of edible oils and fatty acids as a function of frequency, temperature, moisture and composition. *Journal of Food Engineering*, 88 (2): 151-158.
- Lopes, S.I.G. (2002) *Avaliação dos parâmetros genéticos da população de arroz irrigado CNA 11 e da divergência genética entre os genitores*. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 101p.
- Madamba P.S., Yabes R.P. (2005) Determination of the optimum intermittent drying conditions for rough rice (*Oryza sativa* L.). *Lebensm.-Wiss. u.-Technology.*, 38: 157-165.
- Magalhães, P.C., Durães, F.O.M., Schaffert, R.E. (2000) Fisiologia da planta de sorgo (circular técnica). Sete Lagoas, MG. Embrapa Milho e Sorgo, 46p.
- Martins, N. (1994) *Introdução à teoria da eletricidade e do magnetismo*. 6. Reimpressão. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 468p.
- Martins, R.G.R., Gonçalves, L.C., Rodrigues, J.A.S., Rodriguez, N.M., Borges, I., Borges, A.L.C.C. (2003) Consumo e digestibilidade aparente das frações fibrosas de silagens de quatro genótipos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) por ovinos. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 55 (3): 1-4.

- McFarlane, N.J.B. (1987) *Two-frequency capacitance measurement of the moisture content of grain*. Silsoe: AFRC Institute of Engineering Research, 12p.
- Mejia, D., Lewis, B. (1999) *Sorghum: Operações pós colheita*. FAO/ONU, 32p.
- Melo, P.G.S., Morais, O.P., Diniz, J.A., Lobo, V.L.S., Breseghello, F., Fonseca, J.R., Castro, A.P., Bassinello, P.Z., Castro, E.M. (2009) *BRS GO Serra Dourada: cultivar de arroz para a agricultura familiar de Goiás*. Comunicado Técnico n^o. 177. Embrapa: Santo Antônio de Goiás, GO, 4p.
- Meyer, W., Schilz, W.A. (1980) A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 13: 1823-30.
- Mohsenin, N.N. (1984) *Electromagnetic radiation properties of foods and agricultural products*. CRC Press, 673p.
- Monteiro, J.E.B.A. (2009) *Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. Brasília: INMET. 530p.
- Morales, M.E.S., Junco, L.V., Malo, A.L., García, H.S. (2010) Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st century and their potential applications. *LWT - Food Science and Technology*, 43 (8): 1169-1179.
- Moura, E.E. (2012) *Proposta computacional para medição on-line do teor de água de grãos de sorgo*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 147p.
- Moura, E.E., Berbert, P.A., Berbert-Molina, M.A., Oliveira, M.T.R. (2013) Performance analysis of RF dielectric models for density-independent estimation of moisture content in sorghum. *Powder Technology* 246: 369-378.
- Moura, E.E., Berbert, P.A., Souza, E.F., Garcia, R.F., Molina, M.A.B., Oliveira, M.R. O. (2016) Frequency, moisture content, bulk density and hybrid effects on grain sorghum dielectric properties. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 18 (1):236-255.
- MWPS (1980) *Low temperature & solar grain drying*. Ames: Midwest Plan Service & Iowa State University, 86p.
- Murphy, E.J., Morgan, S.O. (1937) The dielectric properties of insulating materials. Part I: Outline of the physico-chemical interpretation of the dielectric constant. *Bell System Technical Journal*, 16: 493-512.
- Navarrete, A., Mato, R.B., Dimitrakis, G., Lester, E., Robinson, J.R., Cocero, M.J., Kingman, S. (2011) Measurement and estimation of aromatic plant dielectric properties. Application to low moisture Rosemary. *Industrial Crops and Products*, 33:697-703.
- Nelson S.O., Soderholm L.H., Yung F.D. (1953) Determining the dielectric properties of grain. *Agricultural Engineering*, 34 (9): 608-610.

- Nelson, S.O. (1965) Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50-MC range. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 8(1): 38-43.
- 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: 181-192.
- Nelson, S.O. (1977) Use of electrical properties for grain-moisture measurement. *Journal of Microwave Power*, 12 (1):67-72.
- Nelson, S.O. (1982) Factors affecting the dielectric properties of grain. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 25 (2):1045-1049, 1056.
- Nelson, S.O. (1984) A mathematical model for estimating the dielectric constant of hard red winter wheat. ASAE Paper No. 84-3546. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers.
- Nelson, S.O. (1991) Dielectric properties of agricultural products. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 26 (5): 845-869.
- Nelson, S.O., Kandala, C.V.K., Lawrence, K.C. (1992) Moisture determination in single grain kernels and nuts by RF impedance measurements. *IEEE Trans Instrum Meas.*, 41 (6):1027-1031.
- Nelson, S.O. (1994) Measurement of microwave dielectric properties of particulate materials. *Transactions of the ASAE*, 39 (4): 1475-1484.
- Nelson, S.O. (1996) Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. *Journal of Food Engineering*, 2 (1): 365–384.
- Nelson, S.O. (1999) Dielectric properties measurement techniques and applications. *Transactions of the ASAE*, 42 (2): 523-529.
- Nelson, S.O. (2005) Dielectric spectroscopy in agriculture. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 351 (33): 2940-2944.
- Nelson, S.O., Trabelsi, S., Kays, S.J. (2006) Dielectric spectroscopy of honeydew melons from 10 MHz to 1.8 GHz for quality sensing. *Transactions of the ASABE*, 49 (6): 1977-1981.
- Nelson, S.O. (2008) Dielectric properties of agricultural products and some applications. *Research in Agricultural Engineering*, 54 (2): 104-112.
- Nelson, S.O., Trabelsi, S. (2009) Influence of water content on RF and microwave dielectric behavior of foods. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy.*, 43 (2):13-23.

- Nelson, S.O., Trabelsi, S. (2010) Measurement of grain and seed moisture and density through permittivity relationships. Proceedings of the International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Austin: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p.964-969.
- Nelson, S.O., Trabelsi, S. (2011) Models for the microwave dielectric properties of grain and seed. *Transactions of the ASABE*, 54 (2): 549-553.
- 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.
- Ondier, G.O., Siebenmorgen, T.J., Mauromoustakos, A. (2010) Low-temperature, low-relative humidity drying of rough rice. *Journal of Food Engineering*, 100: 545-550.
- Pandey, T., Bhuiya, T.K., Singh, R., Singh, B., Harsh, R. (2012) A review on microwave based moisture measurement system for granular materials. *Journal of Electronics and Communication Engineering*, 3 (2): 37-41.
- Peng, J., Tang, J., Jiao, Y., Bohnet, S.G., Barrett, D.M. (2013) Dielectric properties of tomatoes assisting in the development of microwave pasteurization and sterilization processes. *Food Science and Technology*, 54 (2): 367-376.
- Perrier, L., Rouan, L., Jaffuel, S., Clément-Vidal, A., Roques, S., Soutiras, A., Baptiste, C., Bastianelli, D., Fabre, D., Dubois, C., Pot, D., Luquet, D. (2017) Plasticity of Sorghum Stem Biomass Accumulation in Response to Water Deficit: A Multiscale Analysis from Internode Tissue to Plant Level. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1516.
- Pethig, R. (1979) *Dielectric and electronic properties of biological materials*. Chichester: John Wiley & Sons, 390p.
- Pinheiro, L.S. (2008) *Determinação da variabilidade genética nas populações de seleção recorrente de arroz CNA-IRAT 4 E CNA 12 utilizando marcadores microssatélites*. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Goiânia – GO, Universidade Federal de Goiás – UFG, 82p.
- Pires, L.F., Rosa, J.A., Pereira, A.B., Arthur, R.C.J., Bacchi, O.O.S. (2009) Gamma-ray attenuation method as an efficient tool to investigate soil bulk density spatial variability. *Annals of Nuclear Energy*, 36 (11-12):1734-1739.
- Powell, S.D., McLendon, B.D., Nelson, S.O., Kraszewski, A.W., Allison, J.M. (1988) Use of a density independent function and microwave measurement system for grain moisture measurement. *Transactions of the ASAE*, 31 (6):1875-1881.
- Prasad, A., Singh, P.N. (2007) A new approach to predicting the complex permittivity of rice. *Transactions of the ASABE*, 50 (2): 573-582.
- Robert, P. (1988) *Electrical and magnetic properties of materials*. Norwood, MA: Artech House Materials Science Library, 472p.

- Roberts, E.H. (1973) Predicting the storage life of seeds. *Seed Science and Technology* 1 (1): 449-514.
- Rodrigues, J.A.S., Santos, F.G., Schaffert, R.E., Ferreira, A.S., Casela, C.R., Tardin, F.D. (2008) *BRS 655 - Híbrido de sorgo forrageiro para produção de silagem de alta qualidade* (Circular Técnica). Embrapa Milho e Sorgo, 2p.
- Rosso, A.F. (2006) *Caracterização genética e fenotípica para tolerância ao frio e características agrônômicas em arroz irrigado*. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 99p.
- Saab, S.C. (2006) *Apostila de Física Experimental II*. Ponta Grossa: UEPG, 127p.
- 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., Colak, A. (2010) Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. *Powder Technology*, 203: 365-370.
- Santos, F.G., Rodrigues, J.A.S., Schaffert, R.E., Casela, C.R., Ferreira, A.S., Pita, G.V.E. (2004) *Híbrido de Sorgo Granífero BRS 310* (Comunicado Técnico). Embrapa Milho e Sorgo, 4p.
- Santos, F.G., Rodrigues, J.A.S., Schaffert, R.E., Casela, C.R., Ferreira, A.S. (2007) *Híbrido de Sorgo Granífero BRS 308* (Comunicado Técnico). Embrapa Milho e Sorgo, 4p.
- Saravia, C.T., Peres, W.B., Risso, J. (2007) Manejo da temperatura do ar na secagem intermitente de sementes de arroz irrigado. *Revista Brasileira de Sementes*, 29 (2): 23-27.
- Schiffmann, R.F. (2006) Microwave and dielectric drying. In: Mujumdar, A.S. (org.) *Handbook of Industrial Drying*. 3. ed. Taylor & Francis Group. P. 307-327.
- Sharma, G.P., Prasad, S. (2002) Dielectric properties of garlic (*Allium sativum* L.) at 2450 MHz as function of temperature and moisture content. *Journal of Food Engineering* 52:343-348.
- Shrestha, B.L., Wood, H.C., Sokhansanj, S. (2005) Prediction of moisture content of alfalfa using density-independent functions of microwave dielectric properties. *Meas. Sci. Technol.* 16:1179-1185.
- Silva, J.S., Afonso, A.D.L., Donzelles, S.M.L. (2000a) Secagem e secadores. In: Silva, J.S. (ed.) *Secagem e armazenagem de produtos agrícolas*. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, p. 107-138.
- Silva, J.S., Lacerda Filho, A.F., Berbert, P.A. (2000b) Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. In: Silva, J.S. (ed.) *Secagem e armazenagem de produtos agrícolas*. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, p. 395-467.

- Soares, A.A. (2004) *Cultura do arroz*. 2. ed. Lavras: UFLA. 130p.
- Soares, K.J. (2014) *Propriedades dielétricas de sementes de mamão*. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 55p.
- Sosbai (2012) Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado (29^a. Gravataí, SC). *Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil*. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado: Itajaí, SC. 179p.
- Stetson, L.E., Nelson, S.O. (1972) Audiofrequency dielectric properties of grain and seed. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 15 (1): 180-184, 188.
- TACO (2013) Tabela brasileira de composição de alimentos. Versão II. 4. ed. Campinas: NEPA-UNICAMP, 161p.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I.M., Murphy, A. (2017) *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6 ed. Porto Alegre, Artmed, 888p.
- Teter, N. (1987) *Paddy drying manual*. FAO Agricultural Services Bulletin n^o. 70. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 123p.
- Toro, E.A.T. (2006) *Avaliação de linhagens de arroz (Oryza sativa L.) suscetíveis e tolerantes a baixas temperaturas em cruzamentos dialélicos parciais*. Tese (Doutorado em Agronomia) – Piracicaba – SP, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP, 143p.
- Trabelsi, S., Kraszewski, A.W., Nelson, S.O. (1997a) Microwave dielectric properties of shelled, yellow-dent field corn. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, (32): 3: 188-194.
- Trabelsi, S., Kraszewski, A.W., Nelson, S.O. (1997b) A new density-independent function for microwave moisture content determination in particulate materials. Proceedings of the Instrumentation and Measurement Technology Conference, (IMTC/97), New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v.1,,p.648-652.
- Trabelsi, S., Kraszewski, A.W., Nelson, S.O. (1998a) Optimizing a universal calibration for industrial microwave moisture sensors. *IEEE Trans Instrum Meas* 47: 613-622.
- Trabelsi, S., Kraszewski, A.W., Nelson, S.O. (1998b) Nondestructive microwave characterization for determining the bulk density and moisture content of shelled corn. *Meas. Sci. Technol.*, 9 (9):1548–1556.
- Trabelsi, S., Kraszewski, A.W., Nelson, S.O. (2000) Dielectric calibration methods for industrial microwave moisture sensors. *Proceedings of the Second World Congress on Microwave and Radio Frequency Processing*, Orlando, p.42-50.

- Trabelsi, S., Nelson, S.O. (2004) Calibration methods for nondestructive microwave sensing of moisture content and bulk density of granular materials. *Transactions of the ASAE*, 47 (6): 1999-2008.
- Trabelsi, S., Nelson, S.O. (2006) 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.
- Trabelsi, S., Paz, A.M., Nelson, S.O. (2013) Microwave dielectric method for the rapid, nondestructive determination of bulk density and moisture content of peanut hull pellets. *Biosystems Engineering*, 115 (3): 332-338.
- Tulasidas, T.N., Raghavan, G.S.V., Voort, F.V., Girard, R. (1995) Dielectric properties of grapes and sugar solutions at 2.45 GHz. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 30 (2): 117-123.
- USDA (2016) Plants Database: <http://plants.usda.gov> em 21/02/16. Página mantida por United States Department of Agriculture.
- Venkatesh, M.S., Raghavan, G.S.V. (2005) An overview of dielectric properties measuring techniques. *Canadian Biosystems Engineering*, 47 (7): 15-30.
- Vieira, N.R.A., Santos, A.B., Sant'Ana, E.P. (1999) *A cultura do arroz no Brasil*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 633p.
- Von Hippel, A.R. (1966) *Dielectrics and waves*. Cambridge, MA: The MIT Press: 304p.
- Walter, M., Marchezan, E., Avila, L.A. (2008) Arroz: composição e características nutricionais. *Ciência Rural*, 38 (4): 1184-1192.
- Wang, Y., Zhang, L., Gao, M., Tang, J., Wang, S. (2013) Temperature- and moisture-dependent dielectric properties of macadamia nut kernels. *Food Bioprocess Technol.*, 6:2165-2176.
- Yagihara, S., Oyama, M., Inoue, A., Asano, M., Sudo, S., Shinyashiki, N. (2007) Dielectric relaxation measurement and analysis of restricted water structure in rice kernels. *Meas. Sci. Technol.*, 18: 983-990.
- Young, H.D., Freedman, R.A. (2009) *Física III: eletromagnetismo*. São Paulo: Pearson Education do Brasil.
- Zhang, Y., Okamura, S. (1999) New density-independent moisture measurement using microwave phase shifts at two frequencies. *IEEE Trans Instrum Meas*, 48: 1208-1211.

3. TRABALHOS

3.1. Trabalho 1

Berbert, P.A., Moura, E.E., Molina, M.A.B., Soares, K.J., Oliveira MTR. (2017) Density-independent radiofrequency dielectric models for moisture estimation in grain sorghum. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(3):204-212. ISSN 2193-4126. DOI 10.1007/s11694-016-9387-z.

3.2. Trabalho 2

Predicting sorghum moisture content with radiofrequency dielectric functions

Abstract

BACKGROUND: Accurate grain and food moisture content (mc) estimation is an issue of great economic importance in agro-food industry operations such as drying, storage, and processing. Nonetheless, there is a high level of unmet need for on-line mc sensing that could lead to more reliable food processing automation. Dielectric models that relate product mc to its relative permittivity ϵ' and loss factor ϵ'' are considered promising solutions for continuous measurement of moisture in food. The object of this paper was to investigate the applicability of three dielectric models derived from the function $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ for mc measurement of sorghum from 7 to 23% w.b.

RESULTS: Of the three dielectric models tested, the most satisfactory was the function $[(\epsilon' - 1)/\epsilon''] \cdot [(2\sqrt{\epsilon'}) / (1 + \sqrt{\epsilon'})]$ at 0.1 and 1.0 MHz. However, the moisture range had to be divided into two intervals. The corresponding equations could estimate sorghum mc with standard errors of calibration of 0.6 and 0.7, and standard errors of prediction of 0.6 and 0.8 percentage point moisture, for calibration and validation sets respectively.

CONCLUSION: Comparison of the results obtained here with those reported in literature revealed that the function $[(\epsilon' - 1)/\epsilon''] \cdot [(2\sqrt{\epsilon'}) / (1 + \sqrt{\epsilon'})]$ produced mc values which are well within the performance of commercial moisture meters.

Keywords: capacitive sensor; dielectric models; grain bulk density; moisture content; radiofrequencies; sorghum

INTRODUCTION

Knowledge of the moisture content of seeds and grain is important in several stages of the food production chain, from planting to harvesting, in the drying and

storage operations, and in the subsequent industrial processing. Grain moisture content is one of the main parameters used in dryer adjustment and operation, and when grain susceptibility to deterioration during storage is being evaluated, the moisture content is a determining factor. Furthermore, commercial operations involving grain require an accurate determination of grain moisture content.¹⁻⁴

The simultaneous reduction in energy consumption and yield of a product with a homogeneous moisture content after drying is a binomial that must be considered in modern grain pre-processing units. To achieve these goals, technologies such as automatic process control need to be used. In the case of large capacity dryers, fast, on-line and real-time measurements of the moisture content of products in motion are required, without the need to collect localized samples.⁵

The traditional methods of moisture content measurement are time consuming and inadequate to meet these demands. Indirect methods are considered the best for on-line estimation of grain moisture content, especially those using capacitive sensors. These sensors measure the dielectric properties of samples, which can then be directly correlated with the sample moisture content.⁶⁻⁸

The dielectric property that has shown high versatility in the estimation of moisture content is the relative complex permittivity $\epsilon^* = \epsilon' - j \epsilon''$, where the real part ϵ' is the dielectric's relative electric permittivity, the imaginary part ϵ'' is the dielectric loss factor, and $j = \sqrt{-1}$.⁹ The study of functional relations between ϵ' , ϵ'' and the moisture content of grain occupying a capacitive sensor has enabled the development of dielectric models that allow the estimation of grain moisture content, independently of bulk density in the case of static samples or of the mass flow when the samples are in motion.¹⁰

The study by Meyer and Schilz¹¹ aimed to reduce the influence of bulk density or mass flow on moisture content determinations. It is a landmark study of the use of dielectric properties for the on-line estimation of the moisture content of grain products using microwave frequencies. It was the first study to present a dielectric model based on theoretical, mathematical and physical principles, and it resulted in the consistent and elegant derivation of the following function: $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$. This function can be used to evaluate moisture content without influence of the product mass flow or bulk density. Before Meyer and Schilz,¹¹ all models were derived empirically and adapted to the original function to obtain models that could be used for specific products or situations. Among the adaptations made to the Meyer

and Schilz¹¹ equation are those in the studies by Kent and Meyer,¹² Powell *et al.*,¹³ Lawrence and Nelson,¹⁴ Trabelsi *et al.*¹⁵ and Zhang and Okamura.¹⁶ The problem of adapting methods originally developed for microwave frequencies to radiofrequencies is that the resulting equations are not unique to all the products and moisture content intervals that are usually used in grain drying and handling operations. Therefore, the use of different models for different moisture content intervals is necessary.^{17,18} In addition, uniqueness of adapted equations depends on the bulk density interval of the product.¹⁹

Promising results have been obtained for the estimation of sorghum grain moisture content^{20,21} using the model developed by Lawrence and Nelson¹⁴ and the original dielectric model developed by Meyer and Schilz¹¹. However, the applicability of some of the reported adaptations to the Meyer and Schilz model still require evaluation. Thus, the object of this paper was to investigate the applicability of the functions developed by Kent and Meyer,¹² Powell *et al.*¹³ and Zhang and Okamura¹⁶ for the indirect and non-destructive on-line moisture content measurement for grain sorghum from 7 to 23% w.b., with bulk densities ranging from 575 to 818 kg m⁻³ at frequencies in the range of 75 KHz to 5 MHz.

EXPERIMENTAL

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.²² The two parameters of the complex relative permittivity of the sample material were calculated from measurements of the equivalent parallel capacitance (C_p , Farad) and the conductance (G , Siemens) of the sample container, both empty and filled with a grain sample. Relative permittivity ϵ' and loss factor ϵ'' were calculated using Eqns (1) and (2), respectively, where C_m is the measured capacitance of the sample container filled with grain, C_f is the capacitance associated with fringing fields and stray capacitances, G_m is the measured conductance, G_a is the conductance of the empty sample container, ω is the angular frequency of the applied electric field (rad s⁻¹), and C_0 is the capacitance of the empty sample container. Detailed derivations of Eqns (1) and (2) can be found in a previous paper.²³

$$\varepsilon' = \frac{C_m - C_f - 2.1837}{5.7896} \quad (1)$$

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

Equipment and procedures

A Precision LCR meter model 4285A from Hewlett-Packard (Kōbe, Japan) 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}. Measurements were taken with the voltage level set at 1.0 V_{rms} at intervals of 100 kHz from 100 kHz to 1 MHz; 1 MHz from 1 MHz to 5 MHz. A USB/GPIB interface converter model 82357B from Agilent Technologies (Santa Clara, USA) 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 from National Instruments Corporation (Austin, USA). A schematic diagram of the measurement setup is depicted in Fig. 1.

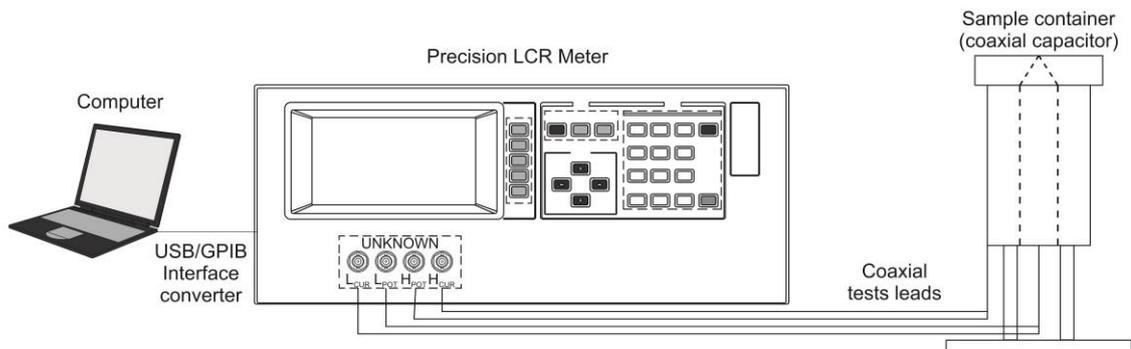


Figura 1. Schematic diagram of the measurement set up.

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 dielectric properties measurements. Seed lots were obtained from the Maize e Sorghum Research Centre of The Brazilian Agricultural Research Corporation, EMBRAPA, after harvest in 2015. 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% w.b. in increments of approximately two percentage points moisture by adding the required amount of distilled water. For reduction of moisture content from 13 to 7% w.b., sub samples were dried for different periods of time at 38 °C in a prototype laboratory dryer. The moisture range studied, 7% to 23% w.b., compares well with the range for calibration of moisture meters assigned by the U.S. Department of Agriculture.²⁴ 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.). Determination of moisture content was made on a wet basis and was carried out according to the International Rules for Seed Testing.²⁵

The method employed to obtain five different levels of bulk density for grain sorghum samples at the same moisture content level is described by Moura *et al.*²⁰ 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 grain sorghum 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 0.2 percentage point moisture), and so no correction was needed.

Density-Independent functions

In this study, the following functions F_1 , F_2 and F_3 , developed by Kent and Meyer,¹² Powell *et al.*,¹³ and Zhang and Okamura,¹⁶ respectively, were considered for density-independent moisture estimation in grain sorghum. In Eqn (5), f_1 e f_2 represent frequencies of oscillation where $f_2 > f_1$.

$$F_1 = \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \frac{2\sqrt{\varepsilon'}}{1 + \sqrt{\varepsilon'}} \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{\sqrt[3]{\varepsilon'} - 1}{\sqrt{\varepsilon''}} \quad (4)$$

$$F_3 = \frac{\sqrt{\varepsilon'_{f_2}} - 1}{\sqrt{\varepsilon'_{f_1}} - 1} \quad (5)$$

Measurement uncertainties and errors in ε' and ε'' estimation

Accuracies in C_p and G measurements were determined following the procedures given by the Precision LCR meter manufacturer.²⁶ These accuracies depend on the frequency of the applied field, the measured impedance of the device under test both empty and filled with the sample, integration time of the A/D converter, the oscillator voltage level, and cable length and temperature correction factors. The associated errors in ε' and ε'' were calculated introducing the uncertainties of the measured values of capacitance and conductance in Eqns (1) and (2).

Statistical analysis

The accuracy of the dielectric models was assessed using three statistical metrics:^{27,28} The coefficient of determination (R^2) between measured and predicted moisture values; the standard error of calibration (SEC), Eqn (6), and the standard error of prediction (or performance) corrected for bias ξ ($SEP-\xi$), Eqn (7). In Eqns (6) and (7), $M_{exp,i}$ and $M_{est,i}$ represent oven (experimental) and estimated moisture contents, respectively, for the i th sample, p is the number of independent variables in the multiple regression model, n is the number of samples used in the calibration. Bias is defined by Eqn (8).

$$SEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{exp,i} - M_{est,i})^2}{n - p - 1}} \quad (6)$$

$$SEP_{-\xi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{exp,i} - M_{est,i} - \xi)^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{exp,i} - M_{est,i})}{n} \quad (8)$$

All samples representing nine levels of moisture content and five levels of bulk density for the four sorghum hybrids were randomly divided into calibration and validation sets to calculate the $SEP_{-\xi}$.²⁹ Hence, the standard error of calibration measures the scatter of the moisture contents determined by the standard oven method about the estimated values predicted by the calibration equation, and the standard error of prediction is the standard deviation of the differences between moisture content determined by the standard oven method and estimated values of moisture content using validation samples.

RESULTS AND DISCUSSION

Use of the dielectric function F_1 to estimate sorghum moisture content

Figure 2 shows the relationship between F_1 and moisture content (M) for sorghum hybrid BRS 308 at 100 kHz and 1 MHz. Similar results were obtained with the other hybrids. It is observed that F_1 is not unique over the whole moisture content range studied. Uniqueness, in the present context, defines a dielectric function, at a selected value of frequency, such that a single input gives a unique output.²⁰ Each value of $[(\epsilon'-1)/\epsilon''] \cdot [(2\sqrt{\epsilon'})/(1+\sqrt{\epsilon'})]$ is associated with a unique value of moisture content. Therefore, there is no single density-independent dielectric model based on the unmodified Kent and Meyer function¹² which is capable of estimating sorghum moisture content from 7 to 23% w.b. moisture. Figure 3 shows the ranges of moisture content, at selected values of frequency, for which F_1 is single valued for the different sorghum hybrids studied. The intervals 7% w.b. $\leq M \leq 13\%$ w.b., at 100 kHz, and 13% w.b. $\leq M \leq 19\%$ w.b., at 1 MHz, cover an appreciable range of moisture contents commonly found in grain and food handling, drying, storage, processing, and packaging operations, and thus the dielectric models for sorghum moisture estimation based on the Kent and Meyer¹²

function will be derived using these latter frequencies. The density independence of F_1 for sorghum hybrid BRS 308 is shown in Fig. 4 where actual (symbols) and mean (lines) values are both displayed.

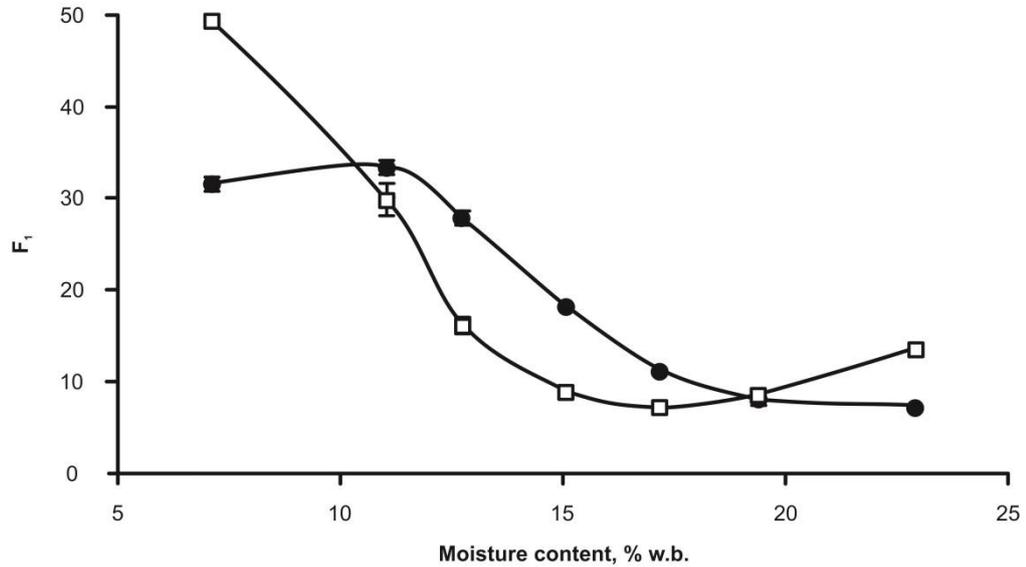


Figure 2. Variation of F_1 as a function of moisture content for sorghum hybrid BRS 308 at 22.3 ± 0.8 °C and $63.6 \pm 5.9\%$ relative humidity, at indicated values of frequency. Symbols: (□) 100 kHz; (●) 1 MHz. Data are mean \pm standard deviation of five replicates.

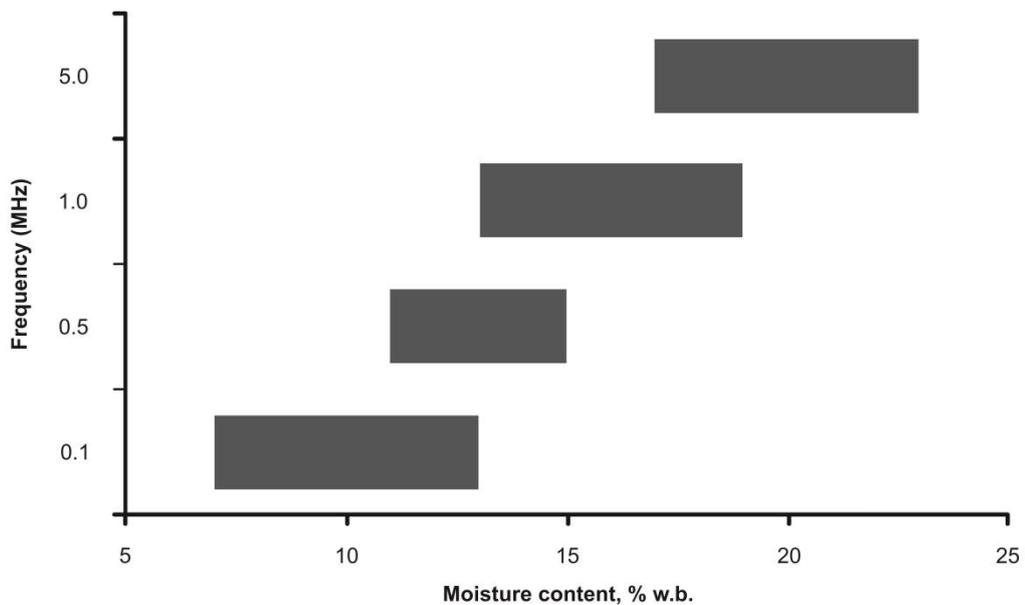


Figure 3. Moisture content intervals which produce unique values of F_1 at selected frequencies for all sorghum hybrids studied.

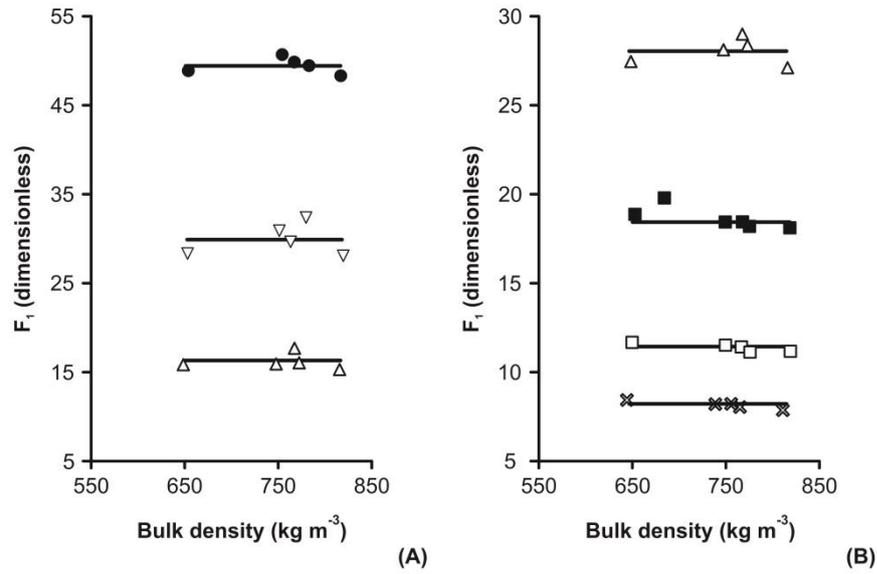


Figure 4. Relationship between F_1 , measured at 100 kHz (A) and 1 MHz (B), and bulk density in sorghum hybrid BRS 308 at 22.4 ± 0.8 °C and $63.9 \pm 6.4\%$ relative humidity, and indicated values of moisture content (% w.b.). Symbols: (●) 7.1; (▽) 11.0; (△) 12.7; (■) 15.0; (□) 17.1; (x) 19.3. Data are mean \pm standard deviation of three replicates. Straight lines represent mean values of F_1 at each moisture content.

Regression analysis was performed to relate moisture content M to F_1 , measured at 100 kHz ($7\% \text{ w.b.} \leq M \leq 13\% \text{ w.b.}$), and Eqn (9) was obtained, with $R^2 = 0.9226$, $\text{SEC} = 0.6$ and a worst-case error of 1.3 percentage points moisture. The calibration equation, Eqn (9), was then used to estimate the moisture content on samples of the validation set with experimental dielectric data points which were not used in developing this equation. The SEP and worst-case error were 0.6 and 1.5 percentage points moisture, respectively. The same procedure was followed to obtain Eqn (10), at 1 MHz, which is valid for the range $13\% \text{ w.b.} \leq M \leq 19\% \text{ w.b.}$, producing the following regression results: $R^2 = 0.8282$, $\text{SEC} = 0.9$, $\text{SEP} = 1.0$, and worst-case errors of 1.8 and 1.9 for the calibration and validation sets, respectively.

$$M_{(7-13\% \text{ w.b.})} = 14.9164 - 0.1675 \left(\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \frac{2\sqrt{\varepsilon'}}{1 + \sqrt{\varepsilon'}} \right)_{100\text{kHz}} \quad (9)$$

$$M_{(13-19\% \text{ w.b.})} = 19.7306 - 0.2759 \left(\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \frac{2\sqrt{\varepsilon'}}{1 + \sqrt{\varepsilon'}} \right)_{1\text{MHz}} \quad (10)$$

Linearity between $\ln(\varepsilon'')$ and the mass of water in cereal grains^{14,23} and common bean,¹⁷ indicates that the introduction of the natural logarithm of the loss factor as a co-variable could improve the performance of moisture content prediction equations for other particulate materials. Thus, in linear combination with $\ln(\varepsilon'')$ _{100 kHz}, the Kent and Meyer¹² function was used at the same frequency in a least-squares regression fit of sorghum calibration data (7% w.b. $\leq M \leq$ 13% w.b.), giving the relationship expressed by Eqn (11), with $R^2 = 0.9233$, SEC = 0.6 and a worst-case error of 1.3 percentage points moisture. The SEP and worst-case error were 0.6 and 1.5 percentage points moisture, respectively. Multiple linear regression was similarly applied to fit sorghum calibration data in the range 13% w.b. $\leq M \leq$ 19% w.b., which lead to Eqn (12) with $R^2 = 0.8956$, SEC = 0.7, SEP = 0.8, and worst-case errors of 1.5 and 2.0 for the calibration and validation sets, respectively.

$$M_{(7-13\%w.b.)} = 15.0208 + 0.2970 \ln(\varepsilon'')_{100\text{kHz}} - 0.1522 \left(\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \frac{2\sqrt{\varepsilon'}}{1 + \sqrt{\varepsilon'}} \right)_{100\text{kHz}} \quad (11)$$

$$M_{(13-19\%w.b.)} = 18.3436 + 2.8052 \ln(\varepsilon'')_{1\text{MHz}} - 0.0199 \left(\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \frac{2\sqrt{\varepsilon'}}{1 + \sqrt{\varepsilon'}} \right)_{1\text{MHz}} \quad (12)$$

The inclusion of $\ln(\varepsilon'')$ _{100 kHz} in the predictive model, Eqn (11), did not provide a significantly better estimation of sorghum moisture content as compared to the unmodified Kent and Meyer model [Eqn (9)]. However, the use of $\ln(\varepsilon'')$ at 1 MHz as a co-variable yielded a model, Eqn (12), which performs slightly better than the original model [Eqn (10)]. The performance of Eqns (9) and (12) in estimating moisture content on samples of the calibration set is presented in Figs. 5A and 6A, while their performance on samples of the validation set is shown in Figs. 5B and 6B, respectively. The continuous line in these figures indicates ideal agreement between measured and predicted values. Relatively few samples lie outside the ± 1 percentage point moisture error limit.³⁰ Errors were normally distributed indicating that the sign of the error was not related to the magnitude of the measured value and that the error distribution has a random character.³¹

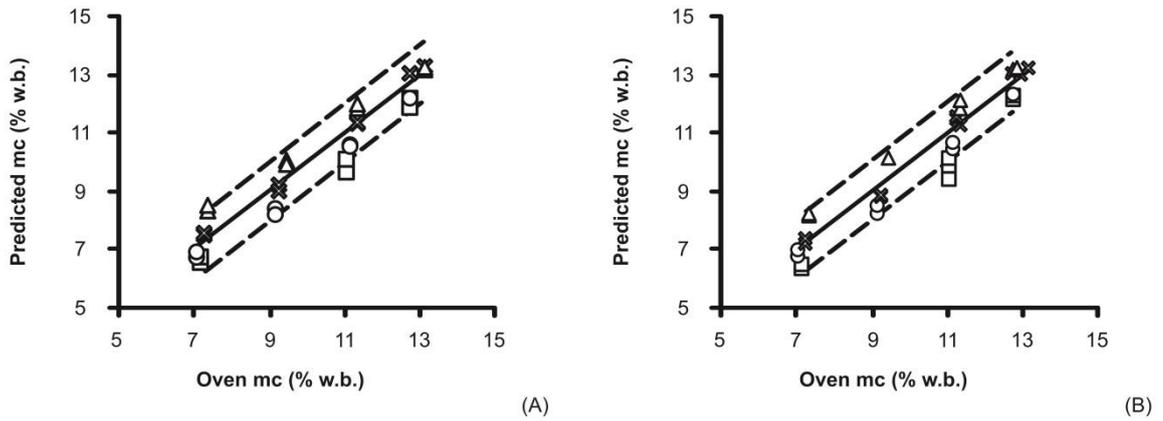


Figure 5. Relationship between oven moisture content (mc) and moisture content predicted by Eqn (9) for samples of the calibration set (A) and validation set (B) for indicated sorghum hybrids. Symbols: (□) BRS 308; (○) BRS 310; (x) BRS 655; (△) CMSXS. Dashed boundary lines represent ± 1.0 percentage point moisture.

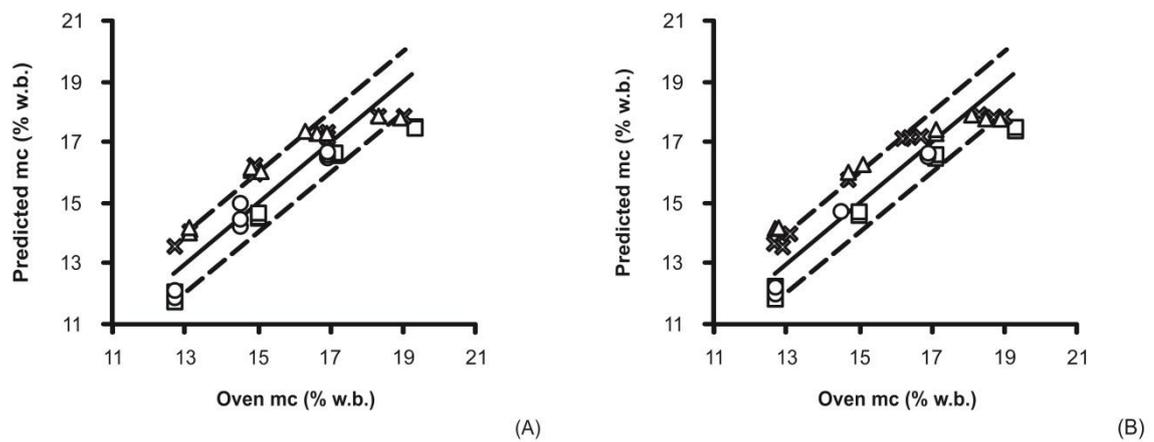


Figure 6. Relationship between oven moisture content (mc) and moisture content predicted by Eqn (12) for samples of the calibration set (A) and validation set (B) for indicated sorghum hybrids. Symbols: (□) BRS 308; (○) BRS 310; (x) BRS 655; (△) CMSXS. Dashed boundary lines represent ± 1.0 percentage point moisture.

Although producing worst case errors of 1.3 to 2.0 percentage points in moisture, which are above the value considered as acceptable for engineering purposes, i.e., 1.0 percentage point in moisture,³⁰ the resulting SEC values, 0.6 and 0.7 percentage point, indicates that the use of the method developed by Kent and Meyer¹² results in slightly better estimates of the moisture content of samples of grain sorghum than the methods examined previously,^{20,21} which produced models that could estimate sorghum moisture content with SEC values of 1.0 and 0.8 percentage point, and maximum errors of 2.2 and 1.8 percentage points in moisture, respectively. As shown in Table 1, the error parameters obtained here

with Eqns (9) and (12) compare well with the statistics obtained in earlier work on alfalfa,³² common bean,³³ fish meal,¹² and wheat²³ which also used the Kent and Meyer¹² function F_1 for moisture estimation.

Table 1. Performance of the dielectric function F_1 in the estimation of moisture content of different agricultural and food products at indicated values of frequency, moisture content, bulk density and temperature. SEC, SEP and MAX units are given in percentage point moisture

Product	Frequency	Moisture content range (% w.b.)	Bulk density range (kg m^{-3})	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	SEC	SEP	MAX [†]
Alfalfa ³²	9.06 GHz	12.0-73.0	139-716	20	0.80	1.92	15.7
Common bean ³³	2 and 5 MHz	11.5-16.0	756-854	20	0.50	—	1.1
Common bean ³³	85 and 100 kHz	16.7-20.6	756-854	20	0.50	—	1.0
Fish meal ¹²	9 GHz	5.0-12.0	290-720	—	0.61	—	—
Wheat ²³	0.5 and 1.0 MHz	11.0-22.0	700-860	21- 24	0.60	0.60	1.4

[†] Worst-case error for the calibration set

Use of the dielectric function F_2 to estimate sorghum moisture content

Calculated values of F_2 at 1 and 5 MHz were plotted against moisture content for sorghum hybrid BRS 310 and the results are shown in Fig. 7. Similarly to the results obtained with F_1 , it is seen that in some portions of the curves different values of moisture content can produce the same value of F_2 . Consequently, there is no single density-independent dielectric model based on the unmodified Powell function which is capable of estimating sorghum moisture content from 7 to 23% w.b. moisture. The ranges of moisture content, at selected values of frequency, for which F_2 is single valued for all sorghum hybrids studied is shown in Fig. 8. The intervals $13\% \text{ w.b.} \leq M \leq 17\% \text{ w.b.}$, at 1 MHz, and $17\% \text{ w.b.} \leq M \leq 23\% \text{ w.b.}$, at 5 MHz, cover a commercially important moisture range found in drying, conveying and storage operations. For this reason, the dielectric models for sorghum moisture estimation based on the Powell function will be derived at 1 and 5 MHz. The density independence of F_2 for sorghum hybrid CMSXS is shown in Fig. 9 where actual (symbols) and mean (lines) values of are both displayed.

Following the same procedure outlined when the density-independence of F_1 was investigated, regression analysis was performed to relate moisture content M to F_2 , measured at 1 MHz ($13\% \text{ w.b.} \leq M \leq 17\% \text{ w.b.}$), and Eqn (13) was obtained with $R^2 = 0.8329$, SEC = 0.7 and a worst-case error of 1.1 percentage points moisture. Validity of the calibration equation was checked using the validation data

set and the SEP and worst-case error were 0.7 and 1.5 percentage points moisture, respectively.

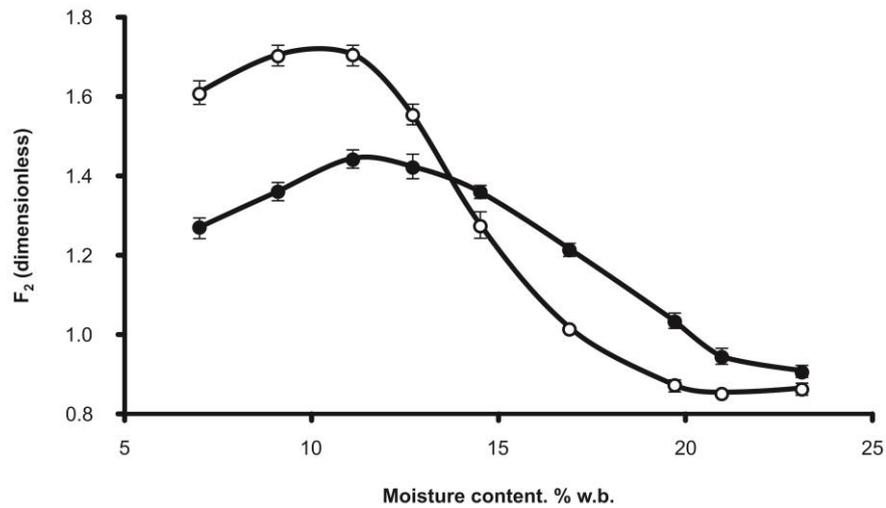


Figure 7. Variation of F_2 as a function of moisture content for sorghum hybrid BRS 310 at 22.4 ± 0.8 °C and $58.5 \pm 4.6\%$ relative humidity, at indicated values of frequency. Symbols: (O) 1 MHz; (●) 5 MHz. Data are mean \pm standard deviation of five replicates.

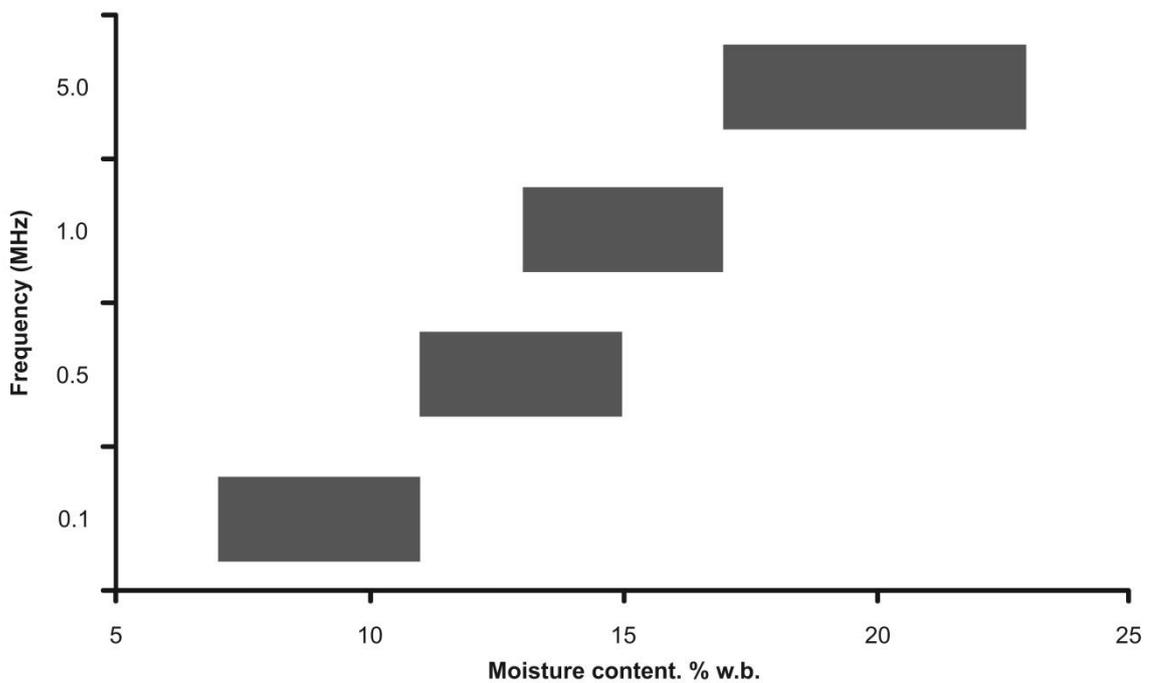


Figure 8. Moisture content intervals which produce unique values of F_2 at selected frequencies for all sorghum hybrids studied.

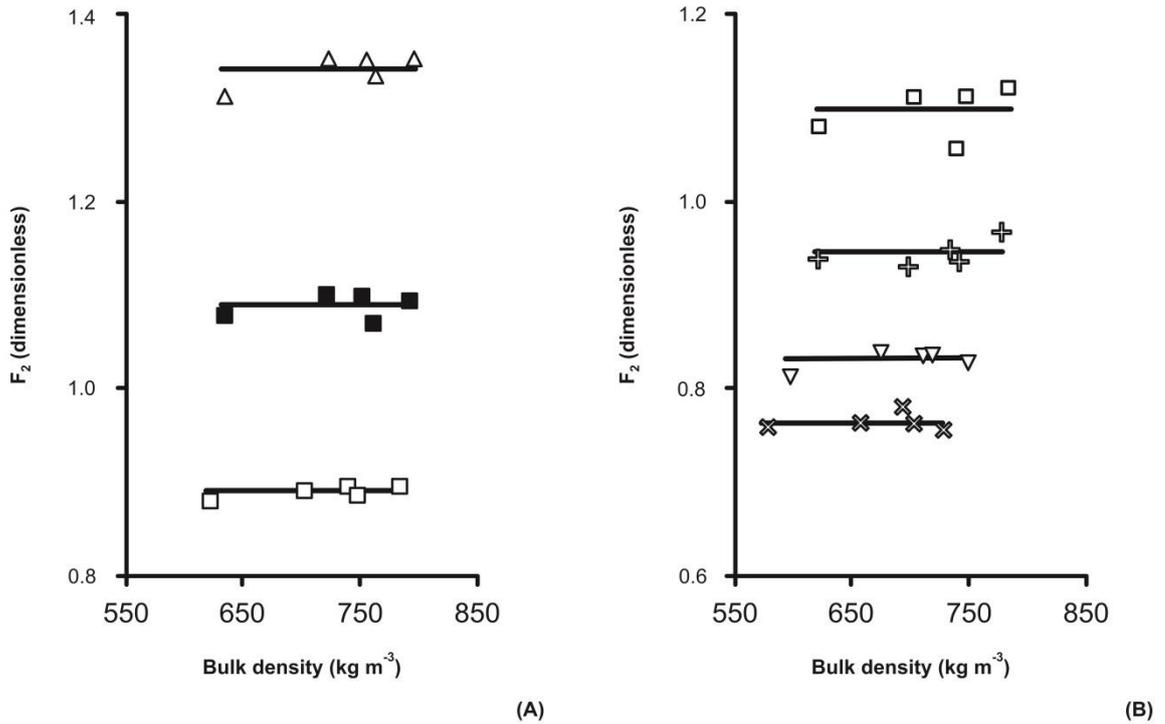


Figure 9. Relationship between F_2 , measured at 1 MHz (A) and 5 MHz (B), and bulk density in sorghum hybrid CMSXS at 22.7 ± 0.8 °C and $61.8 \pm 6.6\%$ relative humidity, and indicated values of moisture content (% w.b.). Symbols: (\triangle) 12.9; (\blacksquare) 14.9; (\square) 16.8; ($+$) 18.5; (∇) 20.4; (\times) 22.5. Data are mean \pm standard deviation of three replicates. Straight lines represent mean values of F_2 at each moisture content.

$$M_{(13-17\%w.b.)} = 23.0152 - 6.7300 \left(\frac{\sqrt[3]{\varepsilon' - 1}}{\sqrt{\varepsilon''}} \right)_{1\text{MHz}} \quad (13)$$

Despite the observed uniqueness of F_2 from 17 to 23% w.b. moisture at 5 MHz, Figs. 7 and 8, assessment of the density independence of this function will be restricted to the range $13\% \text{ w.b.} \leq M \leq 17\% \text{ w.b.}$ Regression analysis of data from the higher part of the moisture content interval exhibited poor coefficients of determination (0.6386 and 0.6773) and disappointing worst-case errors (2.5 to 3.5 percentage points in moisture). In deriving an alternative density-independent equation based on function F_2 , the next approach taken was to use the natural logarithm of the loss factor at 1 MHz, which was previously shown to be a good indicator of sorghum moisture content.²⁰ Multiple linear regression analysis yielded the calibration equation, Eqn (14), for moistures ranging from 13% w.b. to 17% w.b., with a coefficient of determination $R^2 = 0.8535$, a standard error of calibration and worst case error of 0.7 and a 1.1 percentage points in moisture, respectively.

The error parameters for the validation set were 0.7 (SEP) and 1.3 (worst-case error) percentage points in moisture.

$$M_{(13-17\%w.b.)} = 20.4693 + 1.3936 \ln(\varepsilon'')_{1\text{MHz}} - 3.3762 \left(\frac{\sqrt[3]{\varepsilon'} - 1}{\sqrt{\varepsilon''}} \right)_{1\text{MHz}} \quad (14)$$

Inclusion of $\ln(\varepsilon'')_{1\text{MHz}}$ as a co-variable did not significantly improve the performance of the unmodified model given by Eqn (13). Notwithstanding the trend of producing smaller error parameters in sorghum moisture estimation, no essential difference was found between the effectiveness of the calibration equation derived from function F_2 , Eqn (13), and that developed from function F_1 , Eqn (12). However, the calibration equation developed from the Kent and Meyer¹² principles, Eqn (12), operates over a wider range of sorghum moisture. Moreover, although F_1 and F_2 are similarly bulk density-independent (Figs. 4 and 9), F_1 has a better sensitivity to moisture variation and therefore is considered more appropriate to sorghum moisture content estimation. The function developed by Powell *et al.*¹³ was relatively successful in predicting alfalfa³² and wheat³⁴ moisture content at microwave frequencies, 11.3 and 9.06 GHz, respectively, but failed to produce acceptable error statistics for common bean³³ and wheat²³ moisture content prediction at radiofrequencies.

Use of the dielectric function F_3 to estimate sorghum moisture content

Unlike the functions analysed in the previous sections, F_1 and F_2 , which required the measurement of two dielectric parameters, i.e., ε' and ε'' , at a single frequency, the method devised by Zhang and Okamura¹⁶ is based on the sole measurement of ε' at two frequencies of oscillation. In order to verify its applicability to sorghum moisture estimation it is necessary to examine the pair of frequencies that produce unique values of F_3 for the conditions studied. The following pairs of frequencies were tested: (100 kHz, 1 MHz), (100 kHz, 5 MHz), (500 kHz, 5 MHz) and (1 MHz, 5 MHz), but all failed the uniqueness criteria over the whole moisture content range. However, the pair of frequencies (100 kHz, 5 MHz) and (1 MHz, 5 MHz) resulted in values of F_3 that were unique from 13% to 17% w.b. and from 17 to 23% w.b. moisture, respectively, as shown in Fig. 10.

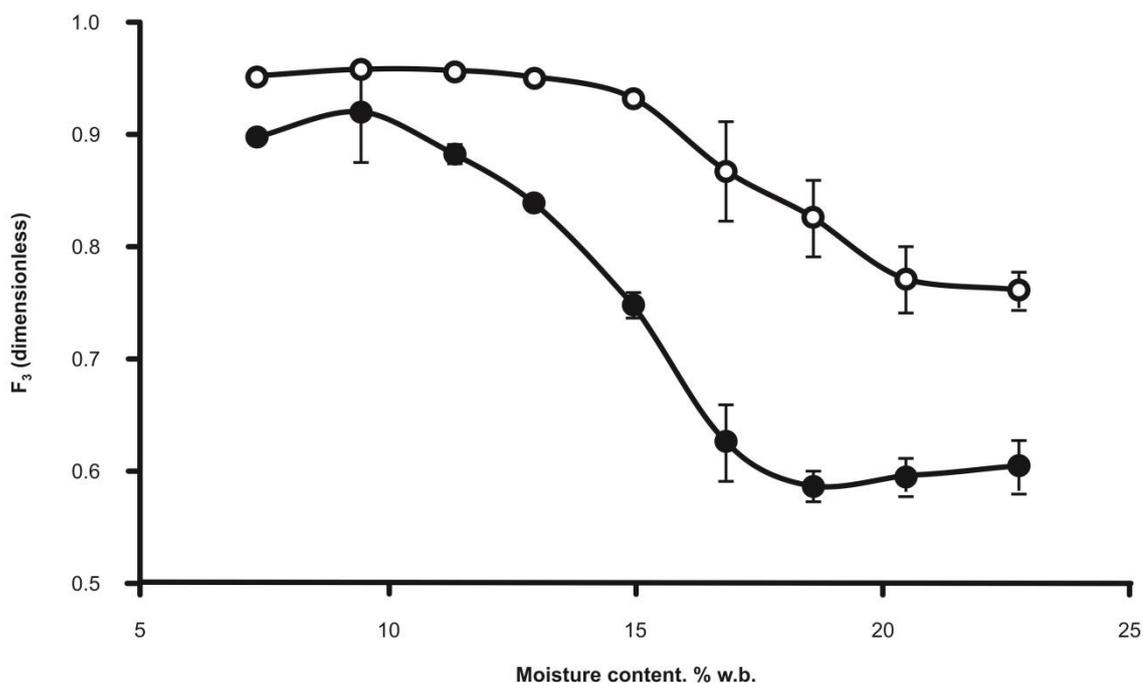


Figure 10. Variation of F_3 as a function of moisture content for sorghum hybrid CMSXS 769 at 22.7 ± 0.8 °C and $61.8 \pm 6.6\%$ relative humidity, at indicated pairs of frequency. Symbols: (●) 100 kHz and 5 MHz; (○) 1 MHz and 5 MHz. Data are mean \pm standard deviation of five replicates.

Figure 11 shows plots of F_3 as a function of bulk density for sorghum hybrid BRS 310 where measured (symbols) and mean (solid lines) values are both displayed. Despite its uniqueness, F_3 is not truly density-independent for moistures in the range from 17 to 23% w.b. and, additionally, the resulting linear regression model predicted M with a low R^2 of 0.5377 and high worst-case errors of 3.3 and 3.9 percentage points moisture for the calibration and validation sets, respectively. For this reason, as was the case with F_2 , analysis of the suitability of F_3 as a density-independent model will be restricted to moistures from 13 to 17% w.b.

Regression analysis was performed to relate moisture content, $13\% \text{ w.b.} \leq M \leq 17\% \text{ w.b.}$, to F_3 , which was obtained from measurements of ε' at 100 kHz and 5 MHz, and Eqn 15 was obtained, with $R^2 = 0.7896$, $\text{SEC} = 0.8$ and a worst-case error of 1.7 percentage points moisture. The calibration equation, Eqn (15), was then validated and the standard error of performance (SEP) and worst-case error were 0.6 and 1.7 percentage points moisture, respectively.

$$M_{(13-17\% \text{ w.b.})} = 29.0842 - 18.2387 \frac{\sqrt{\varepsilon'_{5\text{MHz}} - 1}}{\sqrt{\varepsilon'_{100\text{kHz}} - 1}} \quad (15)$$

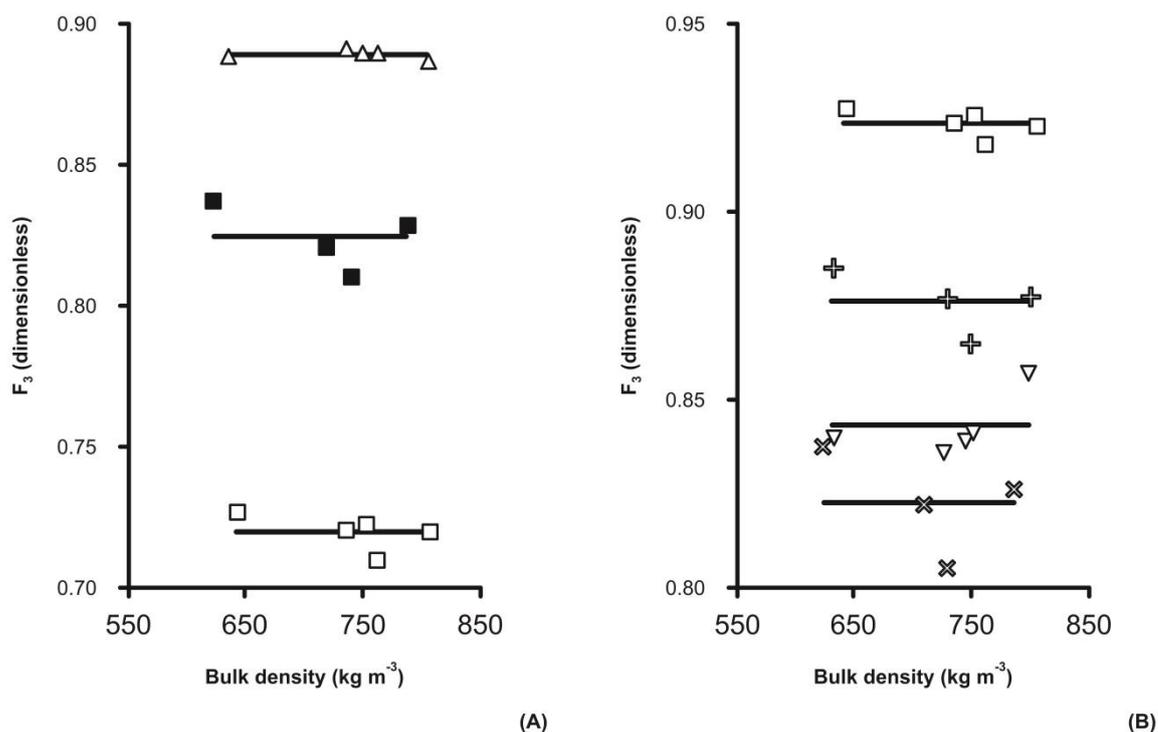


Figure 11. Relationship between F_3 , measured at 100 kHz and 5 MHz (A) and 1 MHz and 5 MHz (B), and bulk density in sorghum hybrid BRS 310 at 22.4 ± 0.8 °C and $58.5 \pm 4.6\%$ relative humidity, and indicated values of moisture content (% w.b.). Symbols: (\triangle) 12.7; (\blacksquare) 14.5; (\square) 16.9; ($+$) 19.7; (∇) 21.0; (\times) 23.1. Data are mean \pm standard deviation of three replicates. Straight lines represent mean values of F_3 at each moisture content.

Error statistics reduced only marginally with the inclusion of either $\ln(\varepsilon'')_{100\text{kHz}}$ or $\ln(\varepsilon'')_{5\text{MHz}}$ as co-variables in the regression analysis as compared to the unmodified Zhang and Okamura¹⁶ function. Even though Eqn (15) allows for the estimation of sorghum moisture with similar error parameters produced by the Kent and Meyer¹² model, Eqn (12) covers a wider agriculturally practical moisture content range. It has additionally been observed that F_3 is less sensitive to fluctuations in moisture content as compared to F_1 . For sorghum hybrid BRS 308, an increase in moisture content from 13 to 19% w.b. prompted a 46% reduction in the value of F_1 measured at 100 kHz. The corresponding reduction in the value of F_3 , at 100 kHz and 5 MHz, was 28%, making it less promising when choosing a moisture calibration equation for grain sorghum. The results obtained here with F_3 compare unfavourably with those obtained in earlier work on moisture estimation of common bean,³³ at radiofrequencies, and of timbers of Douglas Fir, Spruce, and Cedar³⁵ at microwaves.

For comparison purposes, the performances of density-independent functions F_1 , F_2 and F_3 for sorghum moisture estimation can be contrasted, in Table 2, with other dielectric models published in literature. In Table 2, under the column headed Dielectric model, the first superscript after the model name refers to the original paper where the model was described while the second superscript refers to the paper where the model was investigated for sorghum moisture estimation. Asterisk indicates models that were investigated in the present paper.

Table 2. Comparison of the performance of dielectric models for density-independent moisture estimation in sorghum. SEC, SEP and MAX units are given in percentage point moisture

Dielectric model	Variables	R ²	Frequency (MHz)	Moisture content range (% w.b.)	SEC	MAX [†]	SEP	MAX ^{††}
McFarlane ^{37,20}	ε'	0.84	0.075 and 5	13 to 23	2.2	6.0	—	—
Lawrence and Nelson ^{14,20}	ε' , $\ln(\varepsilon'')$	0.89	0.5 and 5	13 to 23	1.8	4.4	—	—
Lawrence and Nelson ^{14,20}	ε' , $\ln(\varepsilon'')$	0.89	1 and 5	13 to 23	1.1	3.4	—	—
Kraszewski and Kulinski ^{38,20}	ε' , $\ln(\varepsilon'')$	—	5	13 to 23	1.2	3.5	—	—
Kraszewski and Kulinski ^{38,20}	ε' , $\ln(\varepsilon'')$	—	5	13 to 21	1.0	2.2	—	—
Meyer and Schilz ^{11,21}	ε' , ε''	0.89	1	9 to 21	1.3	1.2	2.7	2.1
Meyer and Schilz ^{11,21}	ε' , ε''	0.90	1	9 to 17	0.9	0.8	1.5	1.8
Meyer and Schilz ^{11,21}	ε' , ε'' , $\ln(\varepsilon'')$	0.96	1 and 5	11 to 21	0.8	1.8	0.8	1.8
Kent and Meyer (F ₁) ^{12,*}	ε' , ε''	0.92	0.1	7 to 13	0.6	1.3	0.6	1.5
Kent and Meyer (F ₁) ^{12,*}	ε' , ε''	0.83	1	13 to 19	0.9	1.8	1.0	1.9
Kent and Meyer (F ₁) ^{12,*}	ε' , ε'' , $\ln(\varepsilon'')$	0.92	0.1	7 to 13	0.6	0.6	1.3	1.5
Kent and Meyer (F ₁) ^{12,*}	ε' , ε'' , $\ln(\varepsilon'')$	0.90	1	13 to 19	0.7	1.5	0.8	2.0
Powell <i>et al.</i> (F ₂) ^{13,*}	ε' , ε''	0.83	1	13 to 17	0.7	1.1	0.7	1.5
Powell <i>et al.</i> (F ₂) ^{13,*}	ε' , ε'' , $\ln(\varepsilon'')$	0.85	1	13 to 17	0.7	1.1	0.7	1.3
Zhang and Okamura (F ₃) ^{16,*}	ε'	0.79	0.1 and 5	13 to 17	0.8	1.7	0.6	1.7

[†] Worst-case error for the calibration set; ^{††} Worst-case error for the validation set; * present paper

It is seen in Table 2 that both the Meyer and Schilz¹¹ and the Kent and Meyer¹² (F₁) models are better predictors of sorghum moisture content than the other models analysed so far. Both models employ the same variables [ε' , ε'' and $\ln(\varepsilon'')$], were developed from dielectric measurements made at two frequencies, and covers practical ranges of moisture content commonly found in routine grain pre-processing practices, i.e., 11 to 21% w.b. (Meyer and Schilz¹¹) and 7 to 19% w.b. (Kent and Meyer¹²). However, a dielectric model can only be considered satisfactory if the residues obtained are entirely due to random errors of

measurement of the variables involved. 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.³⁶ It has been observed that the dispersion of the residues as a function of predicted moisture values, calculated by Eqns (9) and (12), 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.

CONCLUSIONS

The moisture content of four grain sorghum hybrids were predicted by equations derived from three density-independent dielectric models, F_1 , F_2 , and F_3 , developed by Kent and Meyer,¹² Powell *et al.*,¹³ and Zhang and Okamura,¹⁶ respectively. The equations were obtained from simultaneous measurement of two dielectric parameters, ε' and ε'' , at 0.1, 1.0 and 5.0 MHz. Of the three dielectric models tested, the most satisfactory, in terms of the size of the errors involved, have been the model based on the function $F_1 = [(\varepsilon'-1)/\varepsilon''] \cdot [(2\sqrt{\varepsilon'})/(1+\sqrt{\varepsilon'})]$ combined with $\ln(\varepsilon'')$ at 0.1 and 1.0 MHz. However, F_1 was not a unique function of moisture content in the range from 7 to 23% w.b., so that the moisture range had to be divided into two sub-ranges, 7 to 13% w.b., and 13 to 19% w.b. The corresponding equations could then estimate sorghum moisture content with standard errors of calibration (SEC) of 0.6 and 0.7, and standard errors of prediction (SEP) of 0.6 and 0.8 percentage point moisture, respectively. The worst-case errors for calibration and validation sets varied from 1.3 to 2.0 percentage points in moisture. SEC and SEP values were within the performance which is expected of commercial moisture meters and gives hope that the static measurements, reported here, could be extended to allow measurements to be made on flowing grain.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research work has been sponsored by the Rio de Janeiro State Research Foundation FAPERJ (E-26/203.021/2015), the Brazilian National Council for

Scientific and Technological Development CNPq (472408/2011-9 and 303426/2015-2), 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.

REFERENCES

- 1 Hunt WH and Pixton SW, Moisture – Its significance, behavior, and measurement, in *Storage of Cereal Grains and Their Products*, ed. by Christensen CM. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, pp. 1-55 (1974).
- 2 Le Maguer M, Mechanics and influence of water binding on water activity, in *Water Activity: Theory and Applications to Food*, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 1-25 (1987).
- 3 King RJ, On-line moisture and density measurement of foods using microwave sensors, in *Food Processing Automation IV*, ed. by Lacey R. ASAE, St. Joseph, pp. 127-138 (1995).
- 4 Risius H, Prochnow A, Ammon C, Mellmann J and Hoffmann T. Appropriateness of on-combine moisture measurement for the management of harvesting and postharvest operations and capacity planning in grain harvest. *Biosystems Engineering* **156**: 120-135 (2017).
- 5 Brooker DB, Bakker-Arkema FW and Hall CW. *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. Van Nostrand Reinhold, New York, pp.351-371 (1992).
- 6 Lawrence KC, Funk DB and Windham WR, Dielectric moisture sensor for cereal grains and soybeans. *Trans ASAE* **44**: 1691-1696 (2001).
- 7 Kim KB, Lee, JW, Lee SS, Noh SH and Kim MS, On-Line measurement of grain moisture content using RF impedance. *Trans ASAE* **46**: 861-867 (2003).
- 8 Funk DB, Gillay Z and Meszaros P, Unified moisture algorithm for improved RF dielectric grain moisture measurement. *Meas Sci Technol* **18**: 1004-1015 (2007).
- 9 McKeown MS, Trabelsi S, Tollner EW and Nelson SO, Dielectric spectroscopy measurements for moisture prediction in Vidalia onions. *J Food Eng* **111**: 505-510 (2012).
- 10 Kraszewski AW and Nelson SO, Density-Independent moisture determination in wheat by microwave measurement. *Trans ASAE* **34**: 1776-1783 (1991).
- 11 Meyer W and Schilz W, A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids. *J Phys D: Appl Phys* **13**: 1823-1830 (1980).
- 12 Kent M and Meyer W, A density-independent microwave moisture meter for heterogeneous foodstuffs. *J Food Eng* **1**: 31-42 (1982).
- 13 Powell SD, McLendon BD, Nelson SO, Kraszewski AW and Allison JM, Use of a density independent function and microwave measurement system for grain moisture measurement. *Trans ASAE* **31**: 1875-1881 (1988).

- 14 Lawrence KC and Nelson SO, Radio-frequency density-independent moisture determination in wheat. *Trans ASAE* **36**: 477-483 (1993).
- 15 Trabelsi S, Kraszewski AW and Nelson SO, Optimizing a universal calibration for industrial microwave moisture sensors. *IEEE Trans Instrum Meas* **47**: 613-622 (1998).
- 16 Zhang Y and Okamura S, New density-independent moisture measurement using microwave phase shifts at two frequencies. *IEEE Trans Instrum Meas* **48**: 1208-1211 (1999).
- 17 Berbert PA, Molina MB, Viana AP, Carlesso VO and Oliveira MTR, Meyer and Schilz function to estimate common bean seed water content evaluated by radiofrequency. *Sci Agric (Piracicaba, Braz)* **64**: 569-574 (2007).
- 18 Berbert PA, Molina MB, Carlesso VO and Oliveira MTR, Use of a dielectric function for determination of coffee seeds moisture content. *Bragantia* **67**: 541-548 (2008).
- 19 Kupfer K, Possibilities and limitations of density-independent moisture measurement with microwaves, in *Microwave Aquametry – Electromagnetic Wave Interaction with Water-Containing Materials*, ed. by Kraszewski AW. IEEE Press, New York, pp. 313-327 (1996).
- 20 Moura EE, Berbert PA, Berbert-Molina MA and Oliveira MTR, Performance analysis of RF dielectric models for density-independent estimation of moisture content in sorghum. *Powder Technol* **246**: 369-378 (2013).
- 21 Berbert PA, Soares KJ, Moura EE, Berbert-Molina MA and Oliveira MTR. Density-independent radiofrequency dielectric models for moisture estimation in grain sorghum. *Food Measure* **11**: 204-2012 (2017).
- 22 Berbert PA, Queiroz DM and Melo EC, Dielectric properties of common bean. *Biosystems Engineering* **83**: 449-462 (2002).
- 23 Berbert PA and Stenning BC, Analysis of density-independent equations for determination of moisture content of wheat in the radiofrequency range. *J Agric Eng Res* **65**: 275-286 (1996).
- 24 United States Department of Agriculture, Grain Inspection, Packers and Stockyards Administration, *Moisture Handbook*. USDA: Washington, D.C., pp. 2.1-2.7 (1999).
- 25 International Seed Testing Association, *International Rules for Seed Testing*. ISTA: Bassersdorf, pp. 9.1-9.20 (2010).
- 26 Hewlett-Packard Ltd., *Operation Manual, HP 4285A Precision LCR Meter*. HP Instrument Division: Kōbe, pp. 1.1-1.24 (1992).
- 27 Míka V, Pozdříšek J, Tillmann P, Nerušil P, Buchgraber K and Gruber L, Development of NIR calibration valid for two different grass sample collections. *Czech J Anim Sci* **48**: 419-424 (2003).
- 28 Davies AMC and Fearn T, Back to basics: Calibration statistics. *Spectrosc Eur* **18**: 31-32 (2006).
- 29 Shrestha BL, Wood HC and Sokhansanj S, Prediction of moisture content of alfalfa using density-independent functions of microwave dielectric properties. *Meas Sci Technol* **16**: 1179-1185 (2005).
- 30 Nelson SO, Kandala CVK and Lawrence KC, Moisture determination in single grain kernels and nuts by RF impedance measurements. *IEEE Trans Instrum Meas* **41**: 1027-1031 (1992).
- 31 Kraszewski AW, Trabelsi S and Nelson SO, Moisture content determination in grain by measuring microwave parameters. *Meas Sci Technol* **8**: 857-863 (1997).

- 32 Shrestha BL, Wood HC, Sokhansanj S, Prediction of moisture content of alfalfa using density-independent functions of microwave dielectric properties. *Meas Sci Technol* **16**: 1179-1185 (2005).
- 33 Berbert PA, Queiroz DM, Sousa EF, Viana AP, Detmann E, Carlesso VO, Evaluation of three dielectric models derived from the function $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ for estimating the moisture content of common bean seeds [in Portuguese, with English abstract]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **8**: 92-101 (2004).
- 34 Kraszewski AW, Trabelsi S, Nelson SO, Comparison of density-independent expressions for moisture content determination in wheat at microwave frequencies. *J Agric Eng Res* **71**: 227-237 (1998).
- 35 Zhang Y, Okamura S, New density-independent moisture measurement using microwave phase shifts at two frequencies. *IEEE Trans Instrum Meas* **48**: 1208-1211 (1999).
- 36 Byler RK, Anderson CR, Brook RC, Statistical methods in thin layer parboiled rice drying models, *Trans ASAE* **30** (2): 533–538 (1987).
- 37 McFarlane NJB, *Two-frequency capacitance measurement of the moisture content of grain*. AFRC Institute of Engineering Research: Silsoe, 12p. (1987).
- 38 Kraszewski AW, Kulinski S, An improved microwave method of moisture content measurement and control. *IEEE Trans Ind Electron Control Instrum* **23**: 364-370 (1976).

3.3. Trabalho 3

Modelos dielétricos para estimar o teor de água de sementes de arroz em casca

RESUMO

Avaliou-se o grau de adequação de dez modelos dielétricos para determinação indireta do teor de água de sementes de arroz em casca das cultivares BRS Esmeralda, BRS GO Serra Dourada, BRS Sertaneja e BRS Tropical, com teores de água entre 7 e 23% e massa específica aparente entre 415 e 648 kg m⁻³. Todos os modelos avaliados relacionam a permissividade elétrica relativa ϵ' e o fator de perda dielétrica ϵ'' das amostras de arroz ao seu teor de água, independentemente da massa específica aparente. A medição de ϵ' e ϵ'' foi feita empregando-se um sensor capacitivo preenchido com as sementes e utilizando-se frequências de 0,5, 1,0 e 5,0 MHz. As medições foram realizadas em condições de laboratório a 22,5±1,7 °C e 56±8% de umidade relativa. A escolha do modelo mais adequado foi feita avaliando-se sete parâmetros de erro e o coeficiente de determinação múltiplo. O modelo que apresentou o melhor desempenho na estimativa do teor de água foi aquele que empregou a medição de ϵ' e do $\ln(\epsilon'')$ a 0,5 MHz, com $R^2 = 0,9450$ e erros padrão de calibração e de predição de 1,1 e 1,3 pontos percentuais de umidade, respectivamente.

Palavras-chave: massa específica aparente; modelos dielétricos; *Oryza sativa*; radiofrequência; sensor capacitivo; teor de água.

Predicting rough rice moisture content with radiofrequency dielectric functions

ABSTRACT

The object of this paper was to investigate the applicability of ten dielectric models for indirect moisture content measurement of the following rice cultivars: BRS Esmeralda, BRS GO Serra Dourada, BRS Sertaneja and BRS Tropical from 7 to 23% w.b. moisture and bulk densities varying from 415 e 648 kg m⁻³. These models represent density-independent functional relationships between rice samples relative permittivity ϵ' and loss factor ϵ'' with moisture content. Measurement of both ϵ' and ϵ'' was performed at 0.5, 1.0, and 5.0 MHz, at 22.5±1.7 °C and 56±8% relative humidity, employing a concentric cylinder capacitive sensor filled with the rice samples. Analysis of model performance was made by comparing theoretical results with experimental data using seven error parameters. The best-fit model was represented by an equation which relates rice moisture content with the values of ϵ' and $\ln(\epsilon'')$ measured a 0.5 MHz, producing standard errors of calibration and prediction of 1.1 and 1.3 percentage points moisture, respectively, with a coefficient of determination $R^2 = 0.9450$.

Keywords: capacitive sensor; dielectric models; grain bulk density; moisture content; *Oryza sativa*; radiofrequency.

INTRODUÇÃO

Conhecer o teor de água de sementes e grãos é importante em diversas etapas da cadeia produtiva de alimentos, do plantio à colheita, nas operações de secagem e armazenamento e, posteriormente, no processamento industrial. A

quantidade de água presente nos grãos é uma das principais informações utilizadas no ajuste e operação dos secadores, além de ser fator determinante na avaliação de sua susceptibilidade à deterioração durante o armazenamento. Para garantir a boa qualidade das sementes, um dos principais cuidados é o armazenamento do produto com níveis de teor de água entre 11 e 13%. Quando o produto é armazenado em condições inadequadas, pode haver redução na qualidade do lote, diminuindo assim sua qualidade fisiológica ou até mesmo o inviabilizando para o uso como semente. Ademais, as operações comerciais envolvendo grãos e sementes requer a determinação acurada do seu teor de água.¹⁻⁴

A utilização de modelos dielétricos que sejam independentes da massa específica aparente (em amostras estáticas) ou do fluxo de massa (em amostras em movimento) para estimar o teor de água de sementes on-line tem sido considerada uma ferramenta inovadora no desenvolvimento de sensores que eliminam a necessidade de pesagens ou de se adotar um volume conhecido de amostra.⁵ Trata-se, também, de ferramenta promissora para detectar insetos e presença de impurezas em sementes.⁶

As propriedades mais estudadas no desenvolvimento de modelos dielétricos para estimativa do teor de água de produtos agrícolas granulares são a permissividade elétrica relativa ϵ' e o fator de perda dielétrica ϵ'' . Essas propriedades correspondem, respectivamente, às partes real e imaginária da permissividade complexa relativa $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, em que $j = \sqrt{-1}$.⁷ Modelos dielétricos, no presente caso, são relações funcionais entre ϵ' , ϵ'' e a quantidade de água presente nas sementes (U, % b.u.) que ocupam um sensor capacitivo, $U = f(\epsilon', \epsilon'')$ e permitem estimar o teor de água desses produtos independentemente da massa específica aparente ρ (kg m^{-3}).

A escolha, principalmente de ϵ' , para integrar modelos dielétricos deve-se ao fato de a quantidade de água presente numa amostra de sementes contribuir para aumentar consideravelmente o valor de sua permissividade elétrica. De acordo com Kaatze (1993)⁸ isso ocorre em função do elevado valor da permissividade relativa da água, $\epsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 78,36 \pm 0,05$, a 25 °C, para frequências entre 1 MHz e 55 GHz, quando comparada com os valores obtidos, no presente trabalho, da permissividade elétrica da matéria seca da semente de arroz, $\epsilon' = 2,23 \pm 0,05$, a 22,2 °C, de 75 kHz a 5 MHz. Desta forma, pequenos incrementos na quantidade de água presente nas amostras de sementes resultam em um aumento considerável no valor de ϵ' .

A inclusão de ϵ'' nos modelos dielétricos deve-se ao fato de que sua combinação com ϵ' resultar em funções que são independentes da massa específica da amostra. Encontram-se diversos desses modelos na literatura que são geralmente associados a sensores capacitivos operando em frequências de micro-ondas ou radiofrequências.⁹⁻¹⁶

Os medidores portáteis do teor de água de grãos e sementes existentes no mercado se baseiam na correlação existente entre a quantidade de água presente na amostra e alguma resposta elétrica específica de cada circuito, geralmente capacitivo ou resistivo. Porém, nenhum desses medidores é capaz de eliminar a influência da massa específica aparente do produto no valor medido do teor de água. Ou seja, nenhum desses medidores tradicionais se presta a situações em que é necessário fazer a medição on-line do teor de água com os grãos em movimento, sem a necessidade da retirada de amostras localizadas. Essas situações podem ser encontradas quando se deseja medir o teor de água continuamente durante a colheita para fins de cálculo de produtividade ou quando

se quer determiná-lo nos locais de entrada e/ou de saída dos grãos em um secador para programar sua automação.

Ainda não há no mercado medidores que meçam simultaneamente ϵ' e ϵ'' , consideradas propriedades fundamentais da matéria, para estimar o teor de água de produtos agrícolas granulares e que, portanto, permitam a diminuição ou eliminação da massa específica aparente ou do fluxo de massa no valor medido. Para o desenvolvimento de um medidor on-line é preciso estudar as propriedades dos mais diversos produtos, de forma a torná-lo o mais abrangente possível. Nesse sentido, já foram estudadas nos últimos 40 anos as propriedades dielétricas, tanto em radiofrequências quanto em micro-ondas, de diversos produtos agrícolas como o milho,^{17,18} arroz,^{19,20,21} trigo,^{22,23} cevada,²⁴ sorgo,^{5,25} soja,^{26,27} linhaça,²⁸ amendoim,²⁹ feijão,³⁰ café em pergaminho,³¹ sementes de mamão,³² e noz macadâmia,³³ dentre outros. No entanto, o estudo das propriedades dielétricas de alguns desses produtos não resultou necessariamente na derivação de modelos dielétricos, em radiofrequências, para a estimativa on-line, do seu teor de água e, dentre eles, encontra-se o arroz. Ou seja, dos principais cereais produzidos mundialmente, tanto em termos de valor econômico quanto de qualidade nutricional, os grãos de arroz são aqueles cujas propriedades dielétricas ainda não foram amplamente empregadas na elaboração de modelos para determinação on-line do seu teor de água.

Sendo assim, de acordo com o exposto anteriormente, o objetivo deste trabalho foi avaliar o grau de adequação de dez tipos de modelos dielétricos previamente avaliados para outros produtos, na estimativa do teor de água sementes de arroz em casca das cultivares BRS Esmeralda, BRS GO Serra Dourada, BRS Sertaneja e BRS Tropical, para frequências entre 75 kHz e 5 MHz,

teores de água entre 7 e 23% b.u, massa específica aparente variando entre 415 e 648 kg m⁻³, em condições de laboratório.

MATERIAL E MÉTODOS

Sensor capacitivo e método de medição de ϵ' e ϵ''

O dispositivo utilizado para conter as amostras durante as medições das propriedades dielétricas das sementes foi o capacitor de cilindros concêntricos (Fig. 1). 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 30,0 mm. Para manter os dois cilindros em posição concêntrica, utilizou-se uma base anular de 11,3 mm de espessura construída de politetrafluoroetileno (PTFE), um termoplástico conhecido comercialmente como teflon[®]. Além de ser um excelente isolante elétrico em uma ampla faixa de frequências, o teflon[®] também é inerte a todos os reagentes químicos em condições normais de temperatura. Tal fato permite a calibração do capacitor utilizando-se líquidos-padrão cujas propriedades dielétricas sejam conhecidas. Devido ao fato de ser constituído por moléculas simétricas e não polares, o teflon[®] possui uma permissividade relativa muito reduzida, $\epsilon'_{\text{PTFE}} = 2$, e praticamente constante em um amplo espectro de frequências.^{34,35} O capacitor foi projetado considerando-se que, no futuro, será também utilizado para medições em linha do teor de água de uma coluna de grãos em movimento. Nesse 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 das peças foi fixada ao eletrodo externo por meio de dois parafusos de

teflon[®]. O volume livre do capacitor é de $5,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, sendo capaz de conter aproximadamente 0,31 kg de arroz em casca com teor de água de 11%.

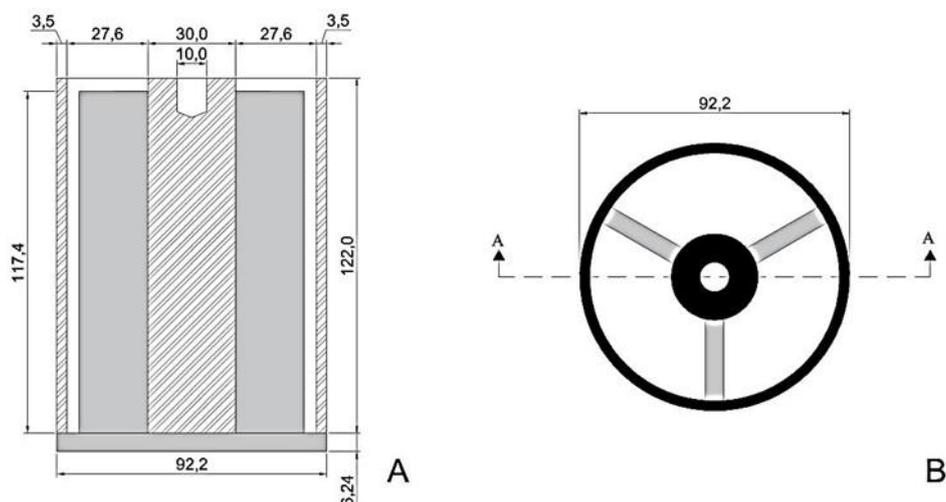


Figura 1. Corte longitudinal e dimensões do capacitor de cilindros concêntricos (A) e vista superior do sensor (B). Dimensões em mm.

Os dois parâmetros da permissividade complexa relativa das amostras de arroz foram calculados a partir da medição da capacitância equivalente em paralelo e da condutância do sensor capacitivo tanto vazio quanto preenchido com as amostras. Em todas as medições elétricas feitas neste trabalho, utilizou-se o circuito paralelo equivalente do medidor. Este circuito interpreta o capacitor como parte integrante de uma combinação capacitor-resistor em paralelo. A permissividade elétrica relativa ϵ' e o fator de perda dielétrica ϵ'' foram calculados empregando-se as Eqs. (1) e (2), respectivamente.²³

$$\epsilon' = \frac{C_m - C_f - 2.1837}{5.7896} \quad (1)$$

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

Nestas equações, C_m representa o valor medido da capacitância do capacitor preenchido com a amostra (pF), C_f representa a capacitância relacionada à deformação das linhas de campo nas bordas do capacitor e a capacitância devido a campos elétricos de circuitos próximos, G_m é a condutância do capacitor preenchido com a amostra (mS), G_a é a condutância do capacitor vazio (μ S), ω é a frequência angular do campo elétrico (rad s^{-1}) e C_0 é a capacitância do capacitor vazio (pF). Os detalhes para obtenção das Eqs. (1) e (2) encontram-se em Berbert e Stenning (1996).²³ Todas as medições foram realizadas em condições de laboratório a $22,5 \pm 1,7$ °C e $56 \pm 8\%$ de umidade relativa.

Equipamento e procedimentos experimentais

A medição dos parâmetros elétricos das amostras foi feita mediante utilização de um medidor LCR, modelo 4285A, fabricado pela Hewlett-Packard (Kôbe, Japão). 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 5 kHz no intervalo entre 75 e 100 kHz, de 100 kHz no intervalo entre 100 kHz e 1 MHz e em incrementos e de 1 MHz no intervalo entre 1 MHz e 5 MHz, utilizando-se voltagem efetiva $V_{\text{ef}} = 1,0$ V. Utilizou-se a configuração com dois pares de terminais para conectar o capacitor ao medidor HP 4285A. Esse tipo de conexão minimiza os problemas relacionados com a indutância mútua, as resistências de contato e os ruídos elétricos.

A interface do HP 4285A é do tipo GPIB (General Purpose Interface Bus), ou seja, trata-se de barramento IEEE-488, tendo sido especialmente concebido para

a transferência de dados entre instrumentos. Trata-se de uma generalização do barramento HP-IB desenvolvido pela HP. Sendo assim, houve a necessidade de utilizar o conversor 82357B – Interface USB/GPIB da Agilent Technologies (Santa Clara, USA) para possibilitar a conexão do computador à interface GPIB por meio da porta USB. A coleta automática de dados foi feita empregando-se programa desenvolvido por Moura (2012)³⁶ usando o software LabVIEW[®] da National Instruments Corporation (Austin, USA). A Fig. 2 mostra o diagrama esquemático do sistema de medição.



Figura 2. Diagrama esquemático do sistema de medição das propriedades dielétricas com coleta automática de dados.

Amostras de sementes de arroz

Utilizaram-se sementes de arroz em casca (classe longo-fino) das cultivares BRS Esmeralda, BRS Sertaneja, BRS Tropical e BRS GO Serra Dourada, todas adaptadas ao cultivo em condições de sequeiro (terras altas) e fornecidas pela Embrapa Arroz e Feijão, situada no município de Santo Antônio de Goiás, GO. Para manutenção de suas características originais, as sementes, com teor de água inicial de 11%, depois de limpas foram acondicionadas em recipientes herméticos de vidro de 700 mL, capazes de conter 0,7 kg de sementes, e depois foram armazenadas em câmara climática do tipo BOD a 5 °C.

Posteriormente, o teor de água de cada amostra foi alterado artificialmente. Para obter amostras, de cada cultivar, com teores de água entre 11 e 23%, com incrementos de dois pontos percentuais de umidade, adicionavam-se quantidades pré-determinadas de água destilada às amostras iniciais. Para a obtenção de amostras com teores de água de 7% e 9%, as amostras com teor de água inicial de 11% foram secadas, por diferentes períodos de tempo e à temperatura de 40 °C, em um protótipo de secador de leito fixo com fluxo de ar ascendente. Depois dos tratamentos de umedecimento e secagem, as amostras foram recolocadas nos recipientes herméticos de vidro e armazenadas a 5 °C por, no mínimo, 15 dias. Durante o período de armazenamento as amostras eram revolvidas três vezes ao dia para permitir uma maior homogeneidade na distribuição de umidade entre as sementes. O intervalo de umidade obtido, 7% a 23%, está de acordo com o intervalo recomendado pelo Departamento de Agricultura dos EUA para calibração de medidores de teor de água.³⁷ O teor de água das sementes foi determinado conforme os procedimentos recomendados pela *International Seed Testing Association* (ISTA, 2010).³⁸

Os procedimentos para determinação do efeito da massa específica aparente ρ (kg m^{-3}) no cálculo do teor de água das amostras, a partir de suas propriedades dielétricas, podem ser encontrados em Berbert *et al.* (2004).³⁹ Os valores de ρ foram calculados dividindo-se a massa da amostra pelo volume livre do sensor. Foram feitas três repetições para cada combinação de valores de teor de água e massa específica aparente. Desta forma, os valores obtidos de ε' e ε'' representam a média de três repetições. As amostras de sementes eram retiradas do ambiente refrigerado 4 h antes da sequência de medições de capacitância e condutância de forma que a temperatura se aproximasse daquela do ambiente. Para comprovar se houve alteração no teor de água das amostras mais úmidas

durante o processo de medição das propriedades dielétricas retiraram-se pequenas sub amostras, tanto antes quanto depois de cada sequência de medição, determinando-se o seu teor de água. Este procedimento permitiu verificar que as alterações foram inferiores a 0,2 ponto percentual de umidade para todo o intervalo de teor de água avaliado.

Modelos dielétricos para o cálculo do teor de água independentemente da massa específica aparente

Dentre os modelos dielétricos encontrados na literatura e que foram desenvolvidos para a estimativa do teor de água de grãos e sementes, foram selecionados nove dos que apresentaram o melhor desempenho para produtos agrícolas granulares. Os modelos originalmente desenvolvidos em frequências de micro-ondas para outros produtos que não o arroz foram aqui adaptados para radiofrequências. Todos eles são baseados em funções do tipo $U = f(\epsilon', \epsilon'')$ modificadas, de forma que ϵ' e ϵ'' são combinados de diversas maneiras de modo a resultar em funções que são independentes da massa específica da amostra. Para efeitos comparativos, avaliou-se também a função inalterada $U = f(\epsilon', \epsilon'')$ que relaciona diretamente os valores de U (% b.u.) aos valores de ϵ' e ϵ'' (adimensionais), medidos em uma mesma frequência. Apresentam-se, na Tabela 1, os dez modelos dielétricos que foram avaliados quanto ao grau de adequação para estimativa on-line do teor de água de sementes de arroz. Nessas funções, F_1 e F_2 representam diferentes frequências de medição. No modelo II, f_3 e f_4 são funções que relacionam a massa de água e a massa de matéria seca das amostras, respectivamente, às propriedades dielétricas. Ou seja, o modelo, foi desenvolvido a partir da definição do teor de água de uma amostra de sementes,

$U = M_a/(M_a+M_{ms})$, em que M_a e M_{ms} representam as massas de água e matéria seca contidas na amostra, respectivamente.

No modelo VI, a_F representa a declividade da reta obtida no plano da permissividade complexa relativa, $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$, porém, no *locus* representado pelos pontos cujas coordenadas são $[(\varepsilon''/\rho), (\varepsilon'/\rho)]$, para determinada frequência. No modelo VIII, $F_2 > F_1$.

Análises preliminares para escolha das frequências F_i , em que $75 \text{ kHz} \leq i \leq 5 \text{ MHz}$, ou pares de frequência nesse mesmo intervalo que resultavam em modelos mais acurados, mostraram que as frequências mais adequadas para redução significativa da influência do valor de ρ (kg m^{-3}) no valor estimado de U (% b.u) foram 0,5, 1,0 e 5 MHz.

Na Tabela 1, os modelos de I a VI foram avaliados por meio da medição de ε' e ε'' em uma única frequência (F) de oscilação, ou seja, 0,5, 1,0 ou 5,0 MHz, dependendo do modelo. Os modelos VII e VIII foram derivados por meio da medição de uma única propriedade dielétrica, ε' , medida simultaneamente em dois valores de frequência: (0,5 MHz e 5,0 MHz) ou (1,0 MHz e 5,0 MHz). Para os modelos IX e X, os melhores resultados foram obtidos por meio da medição das duas propriedades dielétricas, ε' e ε'' , em duas frequências (0,5 e 5,0 MHz) ou (1,0 MHz e 5,0 MHz).

Tabela 1. Modelos dielétricos que foram avaliados para estimativa do teor de água de sementes de arroz, independentemente da massa específica aparente.

Nº do modelo	Fonte original em que o modelo foi descrito	Modelo
I	—	$U = f[\varepsilon', \varepsilon'']_F$
II	Kraszewski e Kulinski (1976) ⁹	$U = \left[\frac{f_3(\varepsilon', \varepsilon'')}{f_3(\varepsilon', \varepsilon'') + f_4(\varepsilon', \varepsilon'')} \right]_F 100$
III	Meyer e Schilz (1980) ¹⁰	$U = f \left[\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \right]_F$
IV	Kent e Meyer (1982) ¹¹ modificado	$U = f \left[\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \frac{2\sqrt{\varepsilon'}}{1 + \sqrt{\varepsilon'}} \right]_F$
V	Powell <i>et al.</i> (1988) ¹³	$U = f \left[\frac{\sqrt[3]{\varepsilon' - 1}}{\sqrt{\varepsilon''}} \right]$
VI	Trabelsi <i>et al.</i> (1998) ¹⁵	$U = f \left[\frac{\varepsilon''}{\varepsilon' (a_F \varepsilon' - \varepsilon'')} \right]$
VII	McFarlane (1987) ¹²	$U = f[\varepsilon'_{F_1}, \varepsilon'_{F_2}]$
VIII	Zhang e Okamura (1999) ¹⁶	$U = f \left[\frac{\sqrt{\varepsilon'_{F_2} - 1}}{\sqrt{\varepsilon'_{F_1} - 1}} \right]$
IX	Lawrence e Nelson (1993) ¹⁴ modificado	$U = f[\varepsilon'_{F_1}, \ln(\varepsilon''_{F_1}), \varepsilon'_{F_2}, \ln(\varepsilon''_{F_2})]$
X	Lawrence e Nelson (1993) ¹⁴ modificado e Meyer e Schilz (1980) ¹⁰	$U = f \left[\left(\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \right)_{F_1}, \left(\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \right)_{F_2}, \ln(\varepsilon''_{F_1}) \right]$

Análise estatística

Para avaliar o desempenho de modelos dielétricos é preciso, inicialmente, escolher um grupo de cultivares que vai constituir o grupo de calibração e a cultivar que vai ser utilizada para validação das equações de calibração, ou seja, a cultivar de verificação. No presente trabalho, as cultivares sorteadas para

obtenção das equações de calibração foram BRS Esmeralda, BRS Sertaneja e BRS Tropical; a cultivar BRS GO Serra Dourada foi sorteada como cultivar de verificação ou validação. Desta forma, por meio da análise de regressão linear múltipla obtêm-se as equações de calibração para todos os dez modelos avaliados. Em uma segunda etapa, os valores obtidos de ε' e ε'' com a cultivar de validação, para cada combinação de teor de água e massa específica aparente, são inseridos em cada equação de calibração para testar seu desempenho. Sendo assim, na etapa de validação, são empregados valores de ε' e ε'' que não foram usados para obtenção das equações de calibração. Na etapa de calibração, o grau de adequação dos modelos é feito comparando-se os valores de teor de água calculados ou estimados pelas equações de regressão (U_{est} , % b.u.) com aqueles determinados experimentalmente pelo método padrão em estufa (U_{exp} , % b. u.). Posteriormente fez-se a validação dos modelos também por comparação das diferenças entre os valores de U_{est} e U_{exp} para a variedade de verificação. As análises de regressão linear múltipla foram feitas empregando-se o programa Statistica v. 8.0.⁴⁰

O grau de adequação dos modelos escolhidos para descrever o fenômeno estudado foi avaliado por meio do cálculo dos seguintes parâmetros estatísticos de erro e de acordo com os seguintes critérios: valor do coeficiente de determinação múltiplo R^2 (Statsoft, 2008)⁴⁰ maior que 0,90; erro padrão de calibração EPC menor que 1,0 (Míka *et al.*, 2003);⁴¹ erro padrão de predição com correção para o viés $EPP_{-\xi}$ menor que 1,0 (Shrestha *et al.*, 2005);⁴² menor valor da raiz do erro quadrático médio REQM (Gunhan *et al.*, 2005),⁴³ erro percentual absoluto médio η menor que 10% (Mundada *et al.*, 2010);⁴⁴ menor intervalo de variação do viés médio ξ (Gunhan *et al.*, 2005),⁴³ e menor valor do qui-quadrado χ^2 (Panchariya *et al.*, 2002).⁴⁵ Além dos parâmetros de erro mencionados,

determinou-se, também, o erro absoluto máximo Δ_{\max} , ou seja, o maior valor observado da diferença $|U_{\text{exp}} - U_{\text{est}}|$. A obtenção de valores de Δ_{\max} menores que 1,0 é indicativa de excelente performance do modelo.

O erro padrão de calibração (EPC) é uma indicação do grau de distanciamento dos valores de teor de água determinados pelo método padrão de estufa em relação aos valores estimados pela equação de calibração. O erro padrão de predição (EPP) representa o desvio padrão das diferenças entre os valores de teor de água determinados em estufa e aqueles estimados pela equação de calibração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelos obtidos por meio da medição de ε' e ε'' em uma única frequência de oscilação (Modelos I a VI)

As análises de regressão feitas para relacionar ε' e ε'' , medidos a 0,5, 1,0 e 5,0 MHz, ao teor de água determinado em estufa, de acordo com o Modelo I, resultaram nas Eqs. (3) a (5), respectivamente.

$$U = 0,6720 \varepsilon'_{0,5\text{MHz}} + 6,2530 \varepsilon''_{0,5\text{MHz}} + 9,4461 \quad (3)$$

$$U = 1,3829 \varepsilon'_{1,0\text{MHz}} + 5,7412 \varepsilon''_{1,0\text{MHz}} + 7,7432 \quad (4)$$

$$U = 3,4914 \varepsilon'_{5,0\text{MHz}} + 5,2733 \varepsilon''_{5,0\text{MHz}} + 2,1263 \quad (5)$$

Os coeficientes de determinação variaram entre $0,74 \leq R^2 \leq 0,79$, valores comparativamente inferiores àqueles verificados na literatura na avaliação de modelos dielétricos, que geralmente são maiores que 0,90.^{21,24,39,42,46} Valores de EPC e EPP no intervalo de $\pm 1,0$ são considerados aceitáveis em termos de

engenharia de desenvolvimento de protótipos de medidores do teor de água.^{5,47} Para as Eqs. (3) a (5), o EPC variou entre 2,2 e 2,4 pontos percentuais de umidade, evidenciando que o Modelo I, obtido pela regressão do tipo $U = f [\varepsilon', \varepsilon'']_F$, não é adequado para estimar o teor de água de sementes de arroz independentemente da massa específica aparente para as condições estudadas. Ou seja, um maior ou menor grau de compactação das sementes no compartimento eletricamente ativo do sensor terá uma influência significativa e deletéria no resultado final indicado pelo medidor.

Apresentam-se, a seguir as equações de regressão obtidas com as variedades de calibração de acordo com os modelos II a VI [Eqs. (6) a (10)].

$$U = \frac{(0,002724 \varepsilon'_{0,5\text{MHz}}) + (0,008725 \ln \varepsilon''_{0,5\text{MHz}}) + 0,044523}{(0,010169 \varepsilon'_{0,5\text{MHz}}) - (0,003183 \ln \varepsilon''_{0,5\text{MHz}}) + 0,238794} \quad (6)$$

Em seu formato original (Tabela 1) o modelo II desenvolvido por Kraszewski e Kulinski (1976)⁹ não inclui o $\ln(\varepsilon'')$ em sua formulação. No entanto, Stetson e Nelson (1972)⁴⁸ sugeriram que, devido à variação irregular do fator de perda dielétrica com a frequência de oscilação do campo no intervalo de 0,25 a 20 kHz, o valor de ε'' não deveria ser utilizado no desenvolvimento de equações para estimar o teor de umidade de grãos e sementes. Nelson (1977)⁴⁹ afirmou que a predominância de medidores elétricos de teor de água que utilizam a permissividade relativa como parâmetro dielétrico deve-se ao fato de o valor de ε' , em comparação com ε'' , exibir menor variabilidade para diferentes lotes de uma mesma cultivar ou mesmo para lotes de diferentes cultivares. No entanto, Lawrence e Nelson (1993)¹⁴ revelaram que, devido à linearidade entre $\ln(\varepsilon'')$ e a

massa de água no trigo a 1,0 MHz, a utilização do logaritmo neperiano do fator de perda dielétrica como covariável contribuiria para melhorar o desempenho das equações para o cálculo do teor de água. Os resultados obtidos no presente trabalho para as cultivares de calibração revelaram que, de fato, o valor de $\ln(\varepsilon'')$ é um bom indicador da quantidade de água presente no arroz em frequências de 0,5, 1,0 e 5,0 MHz.

$$U = 22,14761 - 0,45474 \left(\frac{\varepsilon'_{1\text{MHz}} - 1}{\varepsilon''_{1\text{MHz}}} \right) \quad (7)$$

$$U = 30,4591 \left(\frac{2\sqrt{\varepsilon'}}{1 + \sqrt{\varepsilon'}} \right)_{0,5\text{MHz}} - 0,2313 \left(\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \right)_{0,5\text{MHz}} - 21,5728 \quad (8)$$

$$U = 30,3597 - 12,9473 \left(\frac{\sqrt[3]{\varepsilon'} - 1}{\sqrt{\varepsilon''}} \right)_{1,0\text{MHz}} \quad (9)$$

$$U = 49,56371 \left[\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'(0,3487\varepsilon' - \varepsilon'')} \right]_{1\text{MHz}} + 10,53461 \quad (10)$$

Apresenta-se, na Tabela 2, o desempenho, considerando-se os parâmetros de erro avaliados, dos Modelos II a VI, Eqs. (6) a (10), respectivamente, na estimativa do teor de água das sementes de arroz, independentemente de ρ .

Tabela 2. Desempenho dos Modelos II a VI na estimativa do teor de água de sementes de arroz, para valores indicados de frequência. Os valores de EPC, EPP, ξ e Δ_{\max} são dados em pontos percentuais de umidade. Os valores de REQM e χ^2 são adimensionais.

Modelo / Equação	Freq. (MHz)	R ²	EPC		EPP- ξ		REQM		η (%)		ξ		χ^2		Δ_{\max}	
			(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)		
II Eq. 6	0,5	0,95	1,1	1,3	1,1	1,6	6,3	10,3	0,0	0,9	1,3	2,6	3,6	3,8		
III Eq. 7	1,0	0,91	1,5	1,9	1,5	1,9	8,4	13,8	0,0	0,9	2,2	3,9	3,7	3,5		
IV Eq. 8	0,5	0,95	1,2	1,5	1,1	1,8	6,8	12,0	0,0	1,1	1,3	3,6	3,9	3,8		
V Eq. 9	1,0	0,90	1,5	1,5	1,5	1,6	8,5	10,5	0,0	0,6	2,3	2,6	4,2	3,9		
VI Eq. 10	1,0	0,74	2,4	2,4	2,4	2,4	14,4	15,6	0,0	-0,1	5,8	5,9	6,3	6,4		

(1) Cultivares de calibração; (2) Cultivar de verificação ou validação.

De acordo com os valores de erro obtidos, verifica-se que o modelo II (Kraszewski e Kulinski, 1976),⁹ Eq. 6, foi aquele que apresentou o melhor desempenho geral na estimativa do teor de água. No entanto, em termos práticos, o desempenho dos modelos IV e V, Kent e Meyer (1982)¹¹ e Powell *et al.* (1988)¹³, Eqs. (8) e (9), respectivamente, não está muito distante daquele observado para o modelo II. Os parâmetros de erro obtidos para o arroz com o modelo II são geralmente maiores que aqueles observados na literatura para outros produtos agrícolas tais como o milho⁹ e o trigo,^{23,50} mas são da mesma magnitude para café em pergaminho⁵¹ e sorgo.²⁵

Observa-se, também na Tabela 2, que todos os modelos produziram erro máximo (Δ_{\max}) muito acima do valor esperado para fins de calibração, ou seja, $\pm 1,0$. Isso ocorreu devido ao fato de as regressões terem sido feitas utilizando-se os dados de todo o intervalo de umidade avaliado ($7\% \leq U \leq 23\%$). A análise da dispersão dos erros mostrou que esses valores elevados de Δ_{\max} ocorreram nos extremos do intervalo de teor de água. Sendo assim, espera-se que o erro máximo seja significativamente reduzido se o intervalo de teor de água para fins de regressão também o for. Nessa primeira etapa de avaliação, verifica-se que o modelo com pior desempenho foi o modelo VI (Trabelsi *et al.*, 1998),¹⁵

representado pela Eq. (10). Praticamente todos os parâmetros de erro associados a esse modelo são maiores que aqueles encontrados na literatura.^{46,52,53}

O desempenho da Eq. (6) na estimativa do teor de água das amostras de calibração é mostrado na Fig. 3A, ao passo que seu desempenho empregando-se as amostra de validação encontra-se na Fig. 3B. Nestas figuras, a linha contínua representa a correspondência ideal entre os valores experimentais e estimados e as linhas tracejadas representam o intervalo correspondente a $\pm 1,0$ ponto percentual de umidade. Apesar de haver apresentado o melhor desempenho entre os modelos analisados nessa seção, a análise das Figs. 3A e 3B, evidencia que o modelo II não propicia a obtenção de uma equação para o cálculo do teor de água de sementes de arroz que seja verdadeiramente independente de sua massa específica aparente. Ou seja, para um mesmo teor de água experimental, há diferentes valores de teor de água estimado, dependendo dos valores da massa específica aparente.

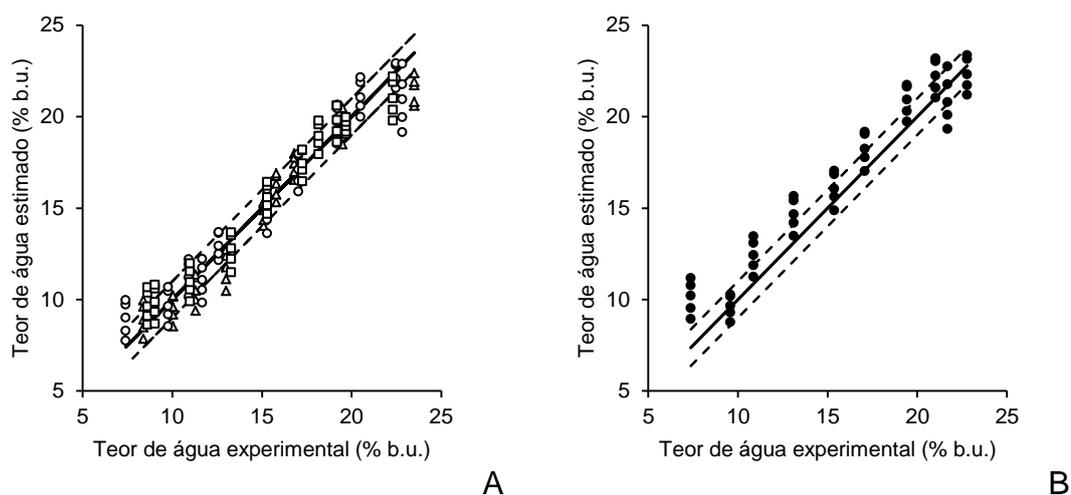


Figura 3. Gráfico de correspondência entre os valores de teor de água determinados pelo método-padrão de estufa (experimental) e aqueles estimados pela Eq. (6), para amostras de arroz das cultivares de calibração (A) e validação (B), a $22,5 \pm 2$ °C e $56 \pm 8\%$ de umidade. Símbolos: \triangle (BRS Esmeralda), \circ (BRS Sertaneja), \square (BRS Tropical) e \bullet (BRS GO Serra Dourada). As linhas tracejadas representam o limite de $\pm 1,0$ ponto percentual de umidade.

Modelos obtidos por meio da medição de uma única propriedade dielétrica (ε') em duas frequências de oscilação (Modelos VII e VIII)

O método proposto por McFarlane (1987)¹² (Modelo VII) baseou-se em trabalho prévio de Dzhemella e Pustynnikov (1965)⁵⁴ desenvolvido para reduzir os efeitos de ρ no grau de acurácia da estimativa do teor de água de grãos de trigo. O método baseia-se no estabelecimento de relações funcionais do tipo $\varepsilon'_{F1} = f(U, \rho)$ e $\varepsilon'_{F2} = f(U, \rho)$. Eliminando ρ e rearranjando a equação de forma a ter U como variável dependente, obteve-se uma função do tipo $U = f(\varepsilon'_{F1}, \varepsilon'_{F2})$. No entanto, em função do nível dos erros obtidos anteriormente em função da adoção desses procedimentos^{55,56} e devido ao fato de, estatisticamente, o método semi-empírico utilizado para a solução de expressões analíticas por separação de variáveis não ser rigoroso, optou-se por relacionar o teor de água das amostras diretamente, por meio de regressão linear, aos valores de ε' medidos simultaneamente em duas frequências. Obteve-se assim a seguinte equação de calibração, Eq. (11), representativa do modelo dielétrico VII para sementes de arroz.

$$U = 6,2654 \varepsilon'_{0,5\text{MHz}} - 4,4741 \varepsilon'_{5\text{MHz}} + 6,7732 \quad (11)$$

Zhang e Okamura (2001)¹⁶ (modelo VIII) desenvolveram um modelo dielétrico, no qual o teor de água de folhas de chá é correlacionado à razão entre os valores de mudança de fase que ocorrem quando ondas eletromagnéticas em duas frequências de micro-ondas interagem simultaneamente com o material. O modelo obtido seria, teoricamente, independente de ρ no intervalo $200 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho \leq 800 \text{ kg m}^{-3}$. Além disso, a função é unívoca para teores de água entre 8 e 33%. Os autores não informaram os valores do erro padrão de calibração nem do erro

máximo. Apresenta-se, a seguir a equação de regressão obtida no presente trabalho com as variedades de calibração de acordo com o modelo VIII, Eq. (12).

$$U = 60,4301 - 51,7294 \left(\frac{\sqrt{\varepsilon'_{5,0\text{MHz}} - 1}}{\sqrt{\varepsilon'_{0,5\text{MHz}} - 1}} \right) \quad (12)$$

Apresenta-se, na Tabela 3, o desempenho, considerando-se os parâmetros de erro avaliados, dos Modelos VII e VIII, Eqs. (11) e (12), respectivamente, na estimativa do teor de água das sementes de arroz. Os resultados revelam que nenhuma das duas equações tem desempenho superior à Eq. (6), modelo II. Os valores dos coeficientes de determinação, do EPC e do $EPP_{-\xi}$, bem como a magnitude dos resíduos (Δ_{\max}) demonstram que o método utilizado não resulta em um modelo adequado para o cálculo do teor de água de sementes de arroz que seja independente da massa específica da amostra. Esses resultados indicam que a medição simultânea de ε' em duas frequências, para as condições estudadas, não é um procedimento adequado para obtenção de um modelo que permita a determinação do teor de água de sementes de arroz com o grau de exatidão exigido em práticas de instrumentação agrícola. Além disso, observou-se, novamente, que os maiores valores de Δ_{\max} ocorreram nos extremos do intervalo de teor de água (7% e 23%). Desta forma, é provável que se os modelos até aqui avaliados houvessem sido desenvolvidos para um menor intervalo de umidade, mas que ainda assim fosse representativo das condições encontradas na prática agrícola, os parâmetros de erro seriam significativamente reduzidos.

Tabela 3. Desempenho dos Modelos VII e VIII, Eqs. (11) e (12), na estimativa do teor de água de sementes de arroz, para valores indicados de frequência. Os valores de EPC, EPP, ξ e Δ_{\max} são dados em pontos percentuais de umidade. Os valores de REQM e χ^2 são adimensionais.

Modelo / Equação	Freqs. (MHz)	R ²	EPC	EPP.		REQM		η (%)		ξ		χ^2		Δ_{\max}	
				(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
VII Eq.11	0,5 e 5,0	0,77	2,3	2,9	2,3	3,3	14,3	19,1	0,0	1,6	5,3	11,2	5,6	9,2	
VIII Eq.12	0,5 e 5,0	0,84	1,9	2,1	1,9	2,3	12,6	15,1	0,0	1,0	5,8	5,3	4,9	4,3	

(1) Cultivares de calibração; (2) Cultivar de verificação ou validação.

Modelos obtidos por meio da medição de duas propriedades dielétricas (ε' e ε'') em duas frequências de oscilação (Modelos IX e X)

As análises de regressão feitas para relacionar ε' e ε'' , medidos a (0,5 e 5,0 MHz) e a (1,0 e 5,0 MHz), ao teor de água determinado estufa, de acordo com o Modelo IX, resultaram nas Eqs. (13) e (14), respectivamente.

$$U = 21,4092 + 1,5136 \varepsilon'_{0,5\text{MHz}} + 3,8732 \ln(\varepsilon''_{0,5\text{MHz}}) - 2,3886\varepsilon'_{5\text{MHz}} - 0,6275\ln(\varepsilon''_{5\text{MHz}}) \quad (13)$$

$$U = 19,2972 + 2,3905 \varepsilon'_{1\text{MHz}} + 5,8071 \ln(\varepsilon''_{1\text{MHz}}) - 2,9271 \varepsilon'_{5\text{MHz}} - 3,2471 \ln(\varepsilon''_{5\text{MHz}}) \quad (14)$$

A combinação dos modelos de Lawrence e Nelson (1993)¹⁴ modificado com o de Meyer e Schilz (1980)¹⁰ resultou na Eq. (15), Modelo X.

$$U = 20,7468 + 3,2637 \ln(\varepsilon''_{0,5\text{MHz}}) - 0,3989 \left(\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \right)_{0,5\text{MHz}} - 0,3079 \left(\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \right)_{5\text{MHz}} \quad (15)$$

Apresentam-se, na Tabela 4, os valores dos parâmetros de erro obtidos com os modelos de Lawrence e Nelson (1993)¹⁴ modificado (Modelo IX), Eqs. (13) e (14), e o resultante da combinação desse último modelo com aquele de Meyer e Schilz (1980)¹⁰, Eq. (15). O desempenho dos três modelos é praticamente o mesmo, com exceção do valor de EPP- ξ (maior no Modelo IX) e do erro percentual absoluto médio η (ligeiramente maior que 10% no Modelo X). Valores de η

superiores a 10% são considerados acima do aceitável para efeitos de ajuste de modelos.^{57,58} No entanto, considerar-se-á o menor valor de $EPP_{-\xi}$ como critério de escolha, uma vez que os valores do erro percentual absoluto médio η , para a cultivar de validação, são muito próximos, $9,3\% \leq \eta \leq 10,6\%$. Desta forma, considera-se que o modelo X, Eq. (15), teve melhor desempenho que o modelo IX, Eqs. (13) e (14). O desempenho da Eq. (15) na estimativa do teor de água das amostras de calibração é mostrado na Fig. 4A, ao passo que seu desempenho empregando-se as amostra de validação encontra-se na Fig. 4B.

Tabela 4. Desempenho dos Modelos IX e X, Eqs. (13) a (15), na estimativa do teor de água de sementes de arroz, para valores indicados de frequência. Os valores de EPC, EPP, ξ e Δ_{max} são dados em pontos percentuais de umidade. Os valores de REQM e χ^2 são adimensionais.

Modelo / Equação	Freq. (MHz)	R^2	EPC	EPP- ξ		REQM		η (%)		ξ		χ^2		Δ_{max}	
				(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)		
IX Eq.13	0,5 e 5,0	0,96	1,0	1,8	1,0	1,6	5,4	9,6	0,0	1,1	1,0	2,7	3,1	3,5	
IX Eq.14	1,0 e 5,0	0,96	1,0	1,8	1,0	1,6	5,6	9,3	0,0	1,1	1,0	2,7	3,2	3,4	
X Eq.15	0,5 e 5,0	0,95	1,1	1,3	1,1	1,6	6,1	10,6	0,0	1,0	1,2	2,7	3,3	3,6	

(1) Cultivares de calibração; (2) Cultivar de verificação ou validação.

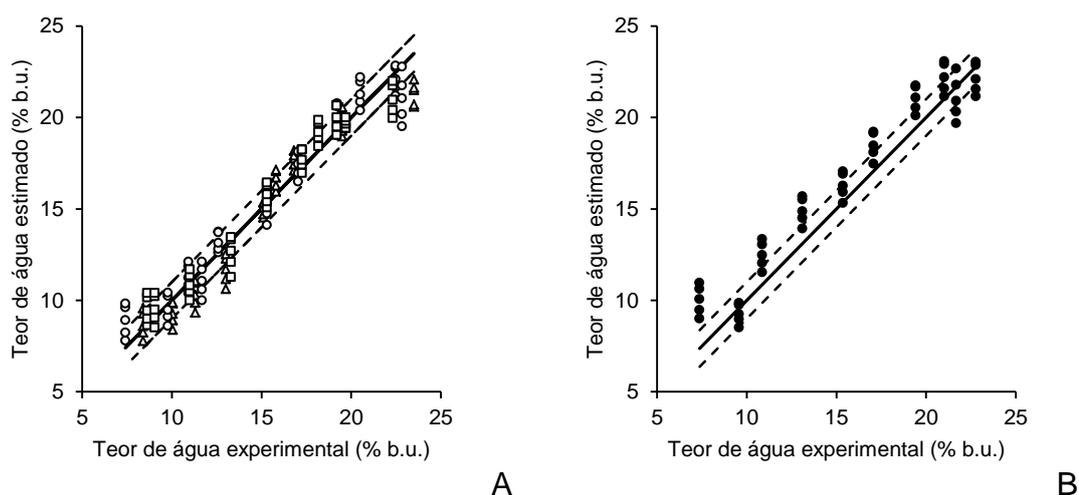


Figura 4. Gráfico de correspondência entre os valores de teor de água determinados pelo método-padrão de estufa (experimental) e aqueles estimados pela Eq. (15), para amostras de arroz das cultivares de calibração (A) e validação (B), a $22,5 \pm 2$ °C e $56 \pm 8\%$ de umidade. Símbolos: Δ (BRS Esmeralda), \circ (BRS Sertaneja), \square (BRS Tropical) e \bullet (BRS GO Serra Dourada). As linhas tracejadas representam o limite de $\pm 1,0$ ponto percentual de umidade.

Comparando-se o desempenho do modelo II, Eq. (6), aquele que resultou nos menores parâmetros de erro até aqui avaliados, com o modelo X, Eq. (15), observa-se que os dois modelos estimam o teor de água de sementes de arroz com o mesmo grau de acurácia. Além disso, ambos superestimam o teor de água próximo ao limite inferior do intervalo (7%) e o subestimam nas proximidades do limite superior (23%). De fato, a análise comparativa das Figuras 3 e 4, mostram uma distribuição de valores praticamente idêntica em todo o intervalo de umidade estudado. A média das diferenças (valores absolutos) entre os teores de água estimados pelo modelo II e aqueles estimados pelo modelo X é igual a $0,21 \pm 0,14$ ponto percentual de umidade, reiterando a proximidade de desempenho dos dois modelos.

Apesar da similaridade no desempenho dos modelos II e X, há que se considerar que a escolha do modelo mais apropriado deve-se basear, também, na análise da dispersão dos resíduos. Modelos apenas podem ser considerados satisfatórios se na estimativa da propriedade que se deseja medir, os resíduos obtidos deverem-se, exclusivamente, a erros aleatórios de medição das variáveis envolvidas. Se for observada qualquer relação funcional entre os resíduos e os valores estimados pelo modelo, pode-se inferir que o modelo é inadequado, indicando que os parâmetros empregados no seu desenvolvimento são insuficientes para explicar a variação dos dados experimentais.⁵⁹

As dispersões dos resíduos em função do teor de água estimado, obtidas para os modelos II e X, para todas as cultivares estudadas, ou seja, as de calibração e a de validação, estão apresentadas nas Figs. 5A e 5B, respectivamente. Em todos os casos, observa-se que não há relação funcional entre o resíduo e o teor de água estimado. Além disso, como havia sido observado para os parâmetros de

erro, a dispersão dos resíduos também é praticamente idêntica nos dois casos, o que ainda não permite escolher um modelo em detrimento do outro.

A escolha do modelo mais apropriado deve considerar, também, o Princípio da Parcimônia, que estabelece que os melhores modelos são aqueles obtidos utilizando-se estruturas aceitáveis e simples, contendo em sua formulação um menor número de parâmetros.⁶⁰ Desta forma, o modelo II, Eq. (6), foi considerado o mais adequado, pois emprega a medição de ε' e ε'' em apenas uma frequência de oscilação, 0,5 MHz, ao passo que o modelo X, Eq. (15), o faz por meio da medição desses mesmos parâmetros em duas frequências, ou seja, 0,5 e 5 MHz.

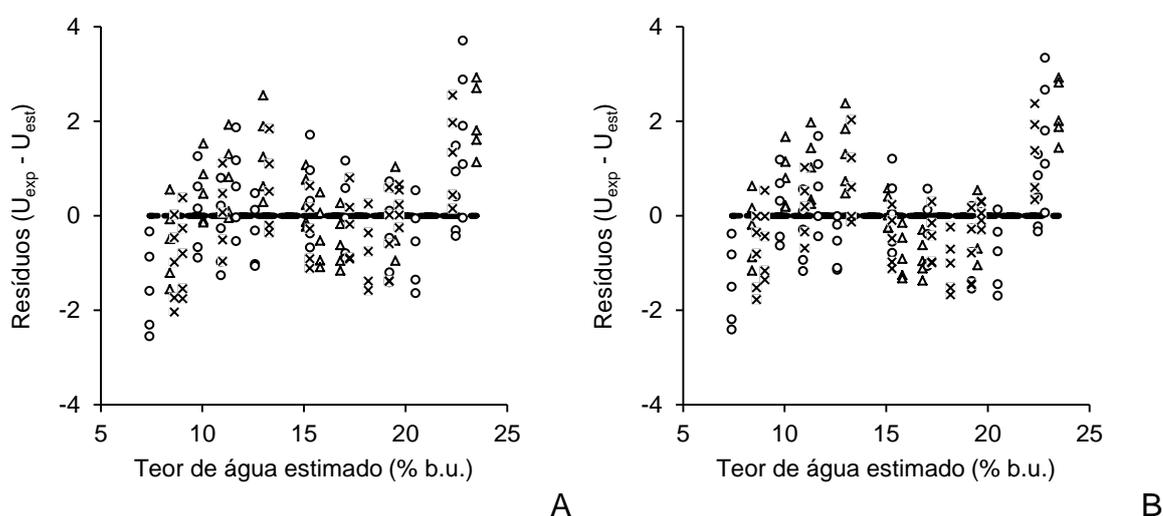


Figura 5. Dispersão dos resíduos em função do teor de água estimado, para os modelos II (A) e X (B), na estimativa do teor de água de sementes de arroz das cultivares de calibração e validação, a $22,5 \pm 2$ °C e $56 \pm 8\%$ de umidade. Símbolos: Δ (BRS Esmeralda), \circ (BRS Sertaneja), \square (BRS Tropical), \times (BRS GO Serra Dourada).

Finalmente, há que se comparar os parâmetros de erro aqui obtidos com o modelo II (Tabela 2) com aqueles descritos na literatura como os mais acurados na estimativa do teor de água de diversos produtos agrícolas. Verificou-se que, em geral, os erros referentes ao modelo II são maiores que os observados na literatura. São os seguintes os intervalos de variação dos erros encontrados na literatura: coeficiente de determinação múltiplo $0,910 \leq R^2 \leq 0,996$,^{21,23,26,39,42,46,61}

erro padrão de calibração $0,4 \leq EPC \leq 2,0$,^{23,25,26,39,42,55,61,62,63} erro padrão de predição $0,3 \leq EPP \leq 5,4$,^{21,23,42,47,50,55,63,64} $0,4 \leq REQM \leq 1,3$,^{21,25,46} viés médio - $0,20 \leq \xi \leq 0,14$,^{21,25,26,50,64} erro máximo $0,7 \leq \Delta_{\max} \leq 3,5$,^{23,25,26,39} Valores do erro percentual absoluto médio η (%) para os modelos mais acurados na estimativa de outras variáveis que não apenas o teor de água (por exemplo, na estimativa da razão de umidade em modelos de secagem de produtos agrícolas), são geralmente inferiores a 10%. O menor valor do qui-quadrado observado na literatura foi $\chi^2 = 1,5$ para o modelo dielétrico que melhor descreveu a estimativa do teor de água em grãos de sorgo.²⁵

CONCLUSÕES

O melhor desempenho geral na estimativa do teor de água de sementes de arroz foi obtido com o modelo dielétrico que empregou a medição de ε' e do $\ln(\varepsilon'')$ a 0,5 MHz, com $R^2 = 0,9450$ e erros padrão de calibração e de predição de 1,1 e 1,3 pontos percentuais de umidade, respectivamente. A magnitude dos demais parâmetros de erro avaliados, com exceção do erro máximo, foi considerada aceitável no âmbito do desenvolvimento de protótipos de medidores do grau de umidade. Os valores dos erros máximos na calibração e na validação, 3,6 e 3,8 pontos percentuais de umidade, respectivamente, indicam a necessidade de aprimoramento do modelo. Isso deverá ser alcançado com a redução do intervalo de teor de água para fins de obtenção de nova equação de calibração, pois os maiores desvios ocorreram justamente nos extremos do intervalo de teor de água avaliado, ou seja, 7 e 23%. Em função dos resultados obtidos, conclui-se que, para as condições avaliadas, o modelo considerado o mais acurado na estimativa

do teor de água de sementes de arroz não é totalmente independente da massa específica aparente das amostras.

AGRADECIMENTOS

O trabalho foi desenvolvido com o apoio financeiro da FAPERJ (E-26/203.021/2015), do CNPq (472408/2011-9 e 303426/2015-2), da FAPEMIG (CAG 112896) e da *International Foundation for Science* IFS (E/2622-3). Os autores agradecem o apoio de Ariane Gaspar Costa e de Márcia Gonzaga de Castro Oliveira, ambas do Setor de Transferência de Tecnologia da Embrapa Arroz e Feijão, pelo envio dos lotes de sementes.

Referências Bibliográficas

- 1 Hunt WH and Pixton SW, Moisture – Its significance, behavior, and measurement, in *Storage of Cereal Grains and Their Products*, ed. by Christensen CM. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, pp. 1-55 (1974).
- 2 Le Maguer M, Mechanics and influence of water binding on water activity, in *Water Activity: Theory and Applications to Food*, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 1-25 (1987).
- 3 King RJ, On-line moisture and density measurement of foods using microwave sensors, in *Food Processing Automation IV*, ed. by Lacey R. ASAE, St. Joseph, pp. 127-138 (1995).
- 4 Risius H, Prochnow A, Ammon C, Mellmann J and Hoffmann T, Appropriateness of on-combine moisture measurement for the management of harvesting and postharvest operations and capacity planning in grain harvest. *Biosystems Engineering* **156**: 120-135 (2017).
- 5 Berbert PA, Soares KJ, Moura EE, Berbert-Molina MA and Oliveira MTR, Predicting sorghum moisture content with radiofrequency dielectric functions. *J Sci Food Agric* (2018) In press.
- 6 Jiao S, Johnson JA, Tang J, Tiwari G and Wang S, Dielectric properties of cowpea weevil, black-eyed peas and mung beans with respect to the development of radio frequency heat treatments. *Biosystems Engineering* **108**: 280-291 (2011).
- 7 McKeown MS, Trabelsi S, Tollner EW and Nelson SO, Dielectric spectroscopy measurements for moisture prediction in *Vidalia* onions. *J Food Eng* **111**: 505-510 (2012).
- 8 Kaatze U, Dielectric relaxation of H₂O/D₂O mixtures. *Chem Phys Lett* **203**: 1-4 (1993).
- 9 Kraszewski AW and Kulinski S, An improved microwave method of moisture content measurement and control. *IEEE Trans Ind Electron Control Instrum* **23**: 364-370 (1976).

- 10 Meyer W and Schilz W, A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids. *J Phys D: Appl Phys* **13**: 1823-1830 (1980).
- 11 Kent M and Meyer W, A density-independent microwave moisture meter for heterogeneous foodstuffs. *J Food Eng* **1**: 31-42 (1982).
- 12 McFarlane NJB, *Two-frequency capacitance measurement of the moisture content of grain*. AFRC Institute of Engineering Research: Silsoe, 12p. (1987).
- 13 Powell SD, McLendon BD, Nelson SO, Kraszewski AW and Allison JM, Use of a density independent function and microwave measurement system for grain moisture measurement. *Trans ASAE* **31**: 1875-1881 (1988).
- 14 Lawrence KC and Nelson SO, Radio-frequency density-independent moisture determination in wheat. *Trans ASAE* **36**: 477-483 (1993).
- 15 Trabelsi S, Kraszewski AW and Nelson SO, Optimizing a universal calibration for industrial microwave moisture sensors. *IEEE Trans Instrum Meas* **47**: 613-622 (1998).
- 16 Zhang Y and Okamura S, New density-independent moisture measurement using microwave phase shifts at two frequencies. *IEEE Trans Instrum Meas* **48**: 1208-1211 (1999).
- 17 Nelson SO, RF and microwave dielectric properties of shelled, yellow-dent field corn, *Trans ASAE* **22**: 1451-1457 (1979).
- 18 Sacilik K and Colak A, Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz, *Powder Technol* **203**: 365-370 (2010).
- 19 Noh SH and Nelson SO, Dielectric-properties of rice at frequencies from 50 Hz to 12 GHz, *Trans ASAE* **32**: 991-998 (1989).
- 20 Prasad A and Singh PN, A new approach to predicting the complex permittivity of rice, *Trans ASABE* **50**: 573-582 (2007).
- 21 Kim KB, Kim JH, Lee SS and Noh SH, Measurement of grain moisture content using microwave attenuation at 10.5 GHz and moisture density. *IEEE Trans Instrum Meas* **51**: 72-77 (2002)
- 22 Nelson SO and Stetson LE, Frequency and moisture dependence of dielectric properties of hard red winter-wheat, *J Agric Eng Res* **21**: 181-192 (1976).
- 23 Berbert PA and Stenning BC, Analysis of density-independent equations for determination of moisture content of wheat in the radiofrequency range, *J Agric Eng Res* **65**: 275-286 (1996).
- 24 Kim KB, Lee JW, Lee SS, Noh SH and Kim MS, On-line measurement of grain moisture content using RF impedance, *Trans ASAE* **46**: 861-867 (2003).
- 25 Moura EE, Berbert PA, Berbert-Molina MA and Oliveira MTR, Performance analysis of RF dielectric models for density-independent estimation of moisture content in sorghum, *Powder Technol* **246**: 369-378 (2013).
- 26 Lawrence KC, Funk DB and Windham WR, Dielectric moisture sensor for cereal grains and soybeans, *Trans ASAE* **44**: 1691-1696 (2001).
- 27 Trabelsi S and Nelson SO, Nondestructive sensing of physical properties of granular materials by microwave permittivity measurement, *IEEE Trans Instrum Meas* **55**: 953-963 (2006).
- 28 Sacilik K, Tarimci C and Colak A, Dielectric properties of flaxseeds as affected by moisture content and bulk density in the radio frequency range, *Biosystems Engineering* **93**: 153-160 (2006).
- 29 Boldor D, Sanders TH and Simunovic J, Dielectric properties of in-shell and

- shelled peanuts at microwave frequencies, *Trans ASAE* **47**: 1159-1169 (2004).
- 30 Berbert PA, Queiroz DM and Melo EC, Dielectric properties of common bean, *Biosystems Engineering* **83**: 449-462 (2002).
- 31 Berbert PA, Queiroz DM, Sousa EF, Molina MB and Melo EC, Dielectric properties of parchment coffee, *J Agric Eng Res* **80**: 65-80 (2001).
- 32 Berbert PA, Soares KJ, Moura EE and Berbert-Molina MA, Dielectric properties of papaya seeds from 75 kHz to 5 MHz, *Seed Sci Res* (2018) In press.
- 33 Wang Y, Zhang L, Gao M, Tang J. and Wang S, Temperature- and moisture-dependent dielectric properties of macadamia nut kernels. *Food Bioprocess Technol* **6**: 2165-2176 (2013).
- 34 Mathes KN, Electrical properties, in *Electrical and Electronic Properties of Polymers: A State-of-the-Art Compendium*, ed. by Kroschwitz JI. John Wiley & Sons, New York, pp. 101-181 (1988).
- 35 Baucchio M, *ASM Engineered Materials Reference Book*, second ed. ASM International, Materials Park (1994)
- 36 Moura EE, *Proposed Computing for On-Line Measurement of the Water Content of Grain Sorghum* [in Portuguese]. UENF, Campos dos Goytacazes, pp. 58-62 (2012).
- 37 United States Department of Agriculture, Grain Inspection, Packers and Stockyards Administration, *Moisture Handbook*. USDA: Washington, D.C., pp. 2.1-2.7 (1999).
- 38 International Seed Testing Association, *International Rules for Seed Testing*. ISTA: Bassersdorf, pp. 9.1-9.20 (2010).
- 39 Berbert PA, Queiroz DM, Sousa EF, Viana AP, Detmann E and Carlesso VO, Evaluation of three dielectric models derived from the function $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ for estimating the moisture content of common bean seeds [in Portuguese]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **8**: 92-101 (2004).
- 40 Statistica™ Software v. 8.0, Statsoft (2008).
- 41 Míka V, Pozdíšek J, Tillmann P, Nerušil P, Buchgraber K and Gruber L, Development of NIR calibration valid for two different grass sample collections, *Czech J Anim Sci* **48**: 419-424 (2003).
- 42 Shrestha BL, Wood HC and Sokhansanj S, Prediction of moisture content of alfalfa using density-independent functions of microwave dielectric properties. *Meas Sci Technol* **16**: 1179-1185 (2005).
- 43 Gunhan T, Demir V, Hancioglu E and Hepbasli A, Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Convers Manage* **46**: 1667-1679 (2005).
- 44 Mundada M, Hathan BS and Maske S, Convective dehydration kinetics of osmotically pretreated pomegranate arils. *Biosystems Engineering* **107**: 307-316 (2010).
- 45 Panchariya PC, Popovic D and Sharma AL, Thin-layer modelling of black tea drying process. *J Food Eng* **52**: 349-357 (2002).
- 46 Digman MF, Conley SP and Lauer JG, Evaluation of a microwave resonator for predicting grain moisture independent of bulk density. *Applied Engineering in Agriculture* **28**: 611-617 (2012).
- 47 Nelson SO, Kandala CVK and Lawrence KC, Moisture determination in single grain kernels and nuts by RF impedance measurements. *IEEE Trans Instrum Meas* **41**: 1027-1031 (1992).
- 48 Stetson, LE and Nelson, SO, Audiofrequency dielectric properties of grain

- and seed. *Trans ASAE* **15**: 180-184, 188 (1972).
- 49 Nelson, SO, Use of electrical properties for grain moisture measurement. *J Microwave Power* **12**: 67-72 (1977).
- 50 Kraszewski AW, Trabelsi S and Nelson SO, Moisture content determination in grain by measuring microwave parameters. *Meas Sci Technol* **8**: 857-863 (1997).
- 51 Berbert PA, Molina MAB, Carlesso VO and Oliveira MTR, Moisture determination in coffee seeds by the capacitance method at radiofrequencies [in Portuguese] *Revista Brasileira de Sementes* **29**: 159-170 (2007).
- 52 Austin J, Rodriguez S, Sung PF and Harris M, Utilizing microwaves for the determination of moisture content independent of density. *Powder Technol* **236**: 17-23 (2013).
- 53 Solar M and Solar A, Non-destructive determination of moisture content in hazelnut (*Corylus avellana* L.). *Computers and Electronics in Agriculture* **121**: 320-330 (2016).
- 54 Dzhemella VV, Pustynnikov VG, Two-parameter instrument for automatic measurement of moisture content in corn. *Instrument Construction*, **7**: 32-34 (1965).
- 55 Berbert PA and Stenning BC, Density-independent moisture content measurement of wheat seed [in Portuguese]. *Pesq agropec bras* **34**: 641-650 (1999).
- 56 Berbert PA, Viana AP, Dionello RG and Carlesso VO, Three dielectric models for estimating common bean moisture content. In: International Drying Symposium, 14, São Paulo: v.B: 1502-1509 (2004).
- 57 Berbert PA, Oliveira MTR and Martinazzo AP, Drying of pineapple slices *in natura* and pre-osmodehydrated in inverted sugar. *Biosci J* **32**: 597-610 (2016).
- 58 Oliveira MTR, Berbert PA, Martinazzo AP and Berbert-Molina MA, Drying kinetics of lemon-scented grass. *Trans ASABE* **54**: 1837-1846 (2011).
- 59 Byler RK, Anderson CR and Brook RC, Statistical methods in thin layer parboiled rice drying models. *Trans ASAE* **30**: 533-538 (1987).
- 60 Lark RM, Some tools for parsimonious modelling and interpretation of within-field variation of soil and crop systems. *Soil Tillage Res* **58**: 99-111 (2001).
- 61 Kraszewski AW, Trabelsi S and Nelson SO, Comparison of density-independent expressions for moisture content determination in wheat at microwave frequencies. *J Agric Eng Res* **71**: 227-237 (1998).
- 62 Zoerb GC, Moore GA and Burrow RR, Continuous measurement of grain moisture content during harvest. *Trans ASAE* **36**: 5-9 (1993).
- 63 Berbert PA, Moura EE, Molina MAB, Soares KJ and Oliveira MTR, Density-independent radiofrequency dielectric models for moisture estimation in grain sorghum. *Food Measure* **11**: 204-212 (2017).
- 64 Kraszewski AW and Nelson SO, Determination of moisture content and bulk density of shelled corn by measurement of microwave parameters. *J Agric Eng Res* **58**: 37-46 (1994).