

REDUÇÃO DA INFLUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA NA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE SEMENTES DE TRIGO¹

PEDRO AMORIM BERBERT² e BRIAN CHRISTOPHER STENNING³

RESUMO - A medição da capacitância e da condutância de um capacitor contendo amostras de trigo permite a determinação de duas de suas propriedades dielétricas: a permissividade relativa (ϵ') e o fator de perda dielétrica (ϵ''). A utilização dessas propriedades, medidas simultaneamente em duas frequências de oscilação do campo elétrico, permite reduzir ou eliminar o efeito da massa específica aparente na determinação do teor de umidade do trigo. Tal procedimento torna possível o monitoramento contínuo e em tempo real, sem a necessidade de retirar amostras, do teor de umidade de uma coluna de grãos em movimento, situação em que ocorrem as maiores variações na massa específica do produto. O objetivo deste trabalho consistiu na obtenção de equações que permitam reduzir ou eliminar o efeito da massa específica na determinação em linha do teor de umidade do trigo. Foram utilizadas amostras das variedades Hussar, Mercia e Hereward com teor de umidade entre 11% e 22% b.u. e massa específica no intervalo $666 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho \leq 873 \text{ kg m}^{-3}$. A equação que apresentou melhor desempenho permite calcular o teor de umidade do trigo com erros-padrão de calibração e de predição de 0,4 e 0,5 ponto percentual, respectivamente.

Termos para indexação: capacitância, propriedades dielétricas, instrumentação.

DENSITY-INDEPENDENT MOISTURE CONTENT MEASUREMENT OF WHEAT SEED

ABSTRACT - Measurement of the capacitance and conductance of a capacitor filled with samples of wheat allows the determination of two dielectric properties of the material: the relative permittivity (ϵ'), and the dielectric loss factor (ϵ''). The use of these two properties, measured simultaneously at two different frequencies of the electric field, permits bulk density-independent measurement of moisture content of wheat. This procedure makes it possible to monitor moisture content continuously, and on-line, of a moving column of grain, a situation where the greatest variations in bulk density are to be expected. The objective of the present research was the derivation of density-independent equations for the determination of moisture content of wheat. Samples of varieties Hussar, Mercia and Hereward at moisture contents ranging from 11% to 22% w.b., and bulk densities ranging from 666 to 873 kg m^{-3} have been used. The best-performance equation was capable of estimating moisture content of wheat with standard errors of calibration and prediction of 0.4 and 0.5 percentage point moisture, respectively.

Index terms: capacitance, dielectric properties, instrumentation.

¹ Aceito para publicação em 15 de outubro de 1998.

Extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada à Cranfield University, UK. Trabalho financiado pela CAPES.

² Eng. Agrícola, Ph.D., Dep. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), CEP 36571-000 Viçosa, MG. E-mail: pberbert@mail.ufv.br

³ Professor, Postharvest Technology Department, Silsoe College, Cranfield University, Silsoe, MK45 4DT, Bedford, UK. E-mail: stbcs@silsoe.cranfield.ac.uk

INTRODUÇÃO

A determinação indireta do teor de umidade de grãos e sementes de cereais e oleaginosas por meio de medidores elétricos ou eletrônicos é um método amplamente utilizado nas unidades de pré-processamento de produtos agrícolas. No entanto, a utilização desses medidores restringe-se ao emprego de amostras estáticas de massa previamente de-

terminada. O teor de umidade é um dos fatores preponderantes na preservação da qualidade dos grãos durante o armazenamento e para a obtenção de um produto de melhor qualidade depois do processamento. Para que isso seja possível, no caso específico do trigo, é necessário que haja informações contínuas e em tempo real a respeito do teor de umidade do produto durante a secagem e imediatamente antes do processo de moagem. O teor de umidade (U) em decimal base úmida, é definido como:

$$U = M_a / (M_a + M_{ms}) \quad (1)$$

em que M_a e M_{ms} representam as massas de água e matéria seca contidas na amostra, respectivamente. Como o cálculo do teor de umidade está sempre associado a um determinado volume (v) do produto, a Equação (1) pode ser reescrita da seguinte forma (Kraszewski, 1988):

$$U = \{(M_a/v) / [(M_a + M_{ms})/v]\} = (\xi/\rho) \quad (2)$$

em que ξ representa a concentração volumétrica de água no material ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{m}^{-3}$), e ρ é a massa específica aparente do produto úmido (kg m^{-3}).

De acordo com Kraszewski (1988), as alterações que ocorrem em sinais elétricos que interajam com amostras úmidas de grãos são proporcionais à concentração volumétrica de água, ξ , sendo praticamente independentes da massa de matéria seca do produto. Desta forma, após a medição indireta de ξ observa-se, na Equação (2), que a determinação do teor de umidade, U , 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 , porém, a utilização desse tipo de sensor em unidades de pré-processamento de grãos é atualmente inviável devido aos altos custos envolvidos. Desta forma, a solução usualmente empregada 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 Equação (2), na determinação do teor de umidade de grãos, as alterações no valor da massa específica provocam efeitos similares aos provo-

cados por alterações na concentração volumétrica de água. Um maior ou menor grau de compactação dos grãos no compartimento eletricamente ativo terá uma grande influência 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 do teor de umidade de grãos.

No entanto, para aplicações industriais de controle em que se deseja medir o teor de umidade de uma coluna de grãos em movimento de forma contínua e em tempo real, sem a necessidade de retirar amostras, o método acima descrito não pode ser aplicado. Vários métodos têm sido propostos para reduzir ou eliminar o efeito da massa específica na determinação em linha do teor de umidade de produtos agrícolas. As soluções encontradas baseiam-se, geralmente, na obtenção de equações empíricas envolvendo propriedades dielétricas do produto, uma vez que seria praticamente impossível controlar a massa específica de grãos em movimento.

Dzhemella & Pustynnikov (1965) desenvolveram um protótipo de medidor do teor de umidade de grãos que se baseava na medição simultânea, em duas frequências, da capacitância de um capacitor de cilindros coaxiais tendo o produto como material dielétrico. O efeito da massa específica do produto sobre a leitura fornecida pelo equipamento foi eliminado por meio da solução de um conjunto de equações lineares do tipo $C_{f1} = aC_{f2} + b$, para cada teor de umidade, em que C_{f1} e C_{f2} representavam as capacitâncias medidas em duas frequências diferentes ($f1$ e $f2$). Os pontos em que estas retas interceptavam o eixo das ordenadas, ou seja, os pontos representados por $b = C_{f1} - aC_{f2}$, dependiam apenas do teor de umidade, sendo independentes da massa específica das amostras.

McFarlane (1987) desenvolveu um método que permitiria, teoricamente, a determinação do teor de umidade do trigo sem o efeito aparente da massa específica das amostras no resultado indicado pelo sensor. Utilizando um capacitor de cilindros coaxiais e um número limitado de amostras de uma mesma variedade de trigo, obteve-se uma equação que relacionava o teor de umidade e os valores da permissividade relativa, ϵ' , do produto medidos simultaneamente em duas frequências. O desvio-pa-

drão das diferenças entre os teores de umidade calculados por meio da equação e os obtidos com o método-padrão de estufa foi de 0,6 ponto percentual, e o erro máximo foi de 1,0 ponto percentual.

O objetivo deste trabalho foi confirmar experimentalmente o método proposto por McFarlane (1987) e estudar outros métodos que permitam eliminar ou reduzir o efeito da massa específica na determinação em linha do teor de umidade de grãos.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Pré-Processamento de Grãos do Departamento de Tecnologia Pós-Colheita do Silsoe College, Universidade de Cranfield, Condado de Bedford, Reino Unido. Todas as medições de propriedades dielétricas foram feitas utilizando-se sementes certificadas de trigo (*Triticum aestivum* L.) variedades Hussar, Hereward e Mercia. As sementes da variedade Hussar foram fornecidas pela ICI Seeds UK Ltd, logo após a colheita em setembro de 1992, com teor de umidade inicial de 14% b.u. As sementes das variedades Hereward e Mercia foram colhidas em 1993 e fornecidas pela Plant Breeding International (PBI Cambridge), também com teor de umidade inicial de 14% b.u.

Para manutenção das características originais, os lotes de sementes foram armazenados inicialmente em sacos de polieteno numa câmara climática sob temperatura de 5°C e umidade relativa de 50%. Posteriormente, os lotes foram subdivididos em amostras de 0,8 kg e o teor de umidade de cada amostra foi alterado artificialmente. Para obter as amostras, de cada variedade, com teores de umidade entre 15% e 22% b.u., com incrementos de um ponto percentual de umidade, adicionavam-se quantidades pré-determinadas de água destilada às amostras iniciais. Para a obtenção de amostras com teores de umidade de 11%, 12% e 13% b.u., as amostras com teor de umidade inicial de 14% b.u. foram secadas, por diferentes períodos de tempo e à temperatura de 30°C, em um protótipo de secador de leito fixo. Depois dos tratamentos de reumedecimento e secagem, as amostras foram colocadas em recipientes de vidro herméticos 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 os grãos. Todas as medições elétricas foram feitas num ambiente com temperatura e umidade relativa variando de 21°C a 24°C e 50% a 65%, respectivamente. O teor de umidade dos grãos foi determi-

nado de acordo com as Regras Britânicas de Testes para Cereais e Leguminosas (British Standards Institution, 1987).

A medição dos parâmetros elétricos das amostras foi feita mediante utilização de um medidor LCR, modelo 4285A, fabricado pela Hewlett-Packard. Este equipamento é capaz de medir 12 parâmetros de impedância, $|Z|e^{j\theta}$, em frequências de teste de 75 kHz a 30 MHz. As propriedades dielétricas foram determinadas em incrementos de 100 kHz no intervalo entre 500 kHz e 1 MHz e em incrementos de 1 MHz no intervalo entre 1 MHz e 5 MHz, utilizando-se uma voltagem efetiva de 1,0 V_{ef} . Utilizou-se a configuração com quatro 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.

O dispositivo utilizado para conter as amostras durante as medições das propriedades dielétricas do trigo foi um 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 29,8 mm. Para manter os dois cilindros em posição concêntrica, utilizou-se uma base anular de 11,3 mm de espessura construída de politetrafluoroetileno (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 proprieda-

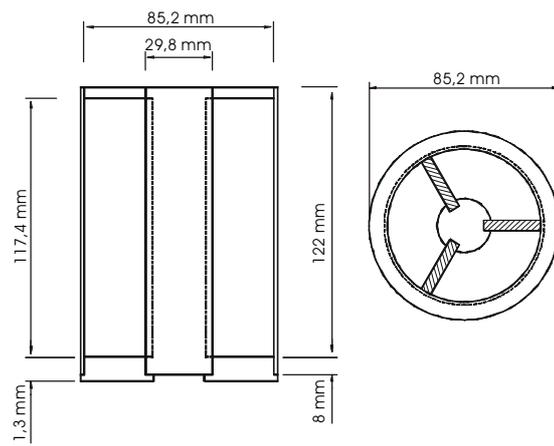


FIG. 1. Capacitor utilizado na determinação das propriedades dielétricas do trigo.

des dielétricas sejam conhecidas. Devido ao fato de ser constituído por moléculas simétricas e não-polares, o teflon possui uma permissividade relativa muito reduzida, $\epsilon'_{PTFE} = 2$, e praticamente constante em um amplo espectro de frequências (Kinney, 1961; Mathes, 1988).

O capacitor foi projetado considerando-se que, no futuro, seria também utilizado para medições em linha do teor de umidade 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. Para facilitar o preenchimento do capacitor com as amostras de trigo, fixou-se um anel de proteção sobre o eletrodo externo e um cone sobre o eletrodo interno, ambos construídos com teflon. O volume livre do capacitor era de $5,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, sendo capaz de conter aproximadamente 0,45 kg de trigo com teor de umidade de 13% b.u.

Os valores dos dois parâmetros que compõem a permissividade complexa relativa do trigo, $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, foram obtidos indiretamente utilizando-se os valores medidos de capacitância e condutância do capacitor, com e sem a amostra entre os eletrodos, de acordo com o método proposto por Lawrence & Nelson (1993). Todas as medições elétricas feitas neste trabalho utilizaram o circuito paralelo equivalente do medidor. Este circuito interpreta o capacitor como parte integrante de uma combinação capacitor-resistor em paralelo. O valor da permissividade relativa do trigo, ϵ' , foi calculado por meio da equação apresentada a seguir, desenvolvida por Berbert (1995), em que C_m representa o valor medido da capacitância do capacitor preenchido com a amostra (pF) e 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 (pF):

$$\epsilon' = (C_m - C_f - 2,1837)/5,7896. \quad (3)$$

O fator de perda dielétrica do trigo, ϵ'' , foi calculado por meio da seguinte equação:

$$\epsilon'' = (G_m - G_a)/\omega C_0 \quad (4)$$

em que:

G_m = condutância do capacitor preenchido com a amostra, S;

G_a = condutância do capacitor vazio, S;

$\omega = 2\pi f$, frequência angular do campo elétrico, em que f = frequência, Hz;

C_0 = capacitância do capacitor vazio, F.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mostra-se, na Fig. 2, a variação da massa específica aparente do trigo, variedades Mercia e Hereward, em função do teor de umidade das amostras. Cada valor de massa específica representa a média obtida em dez repetições utilizando-se uma balança de peso hectolítrico. Verifica-se que, nas condições do presente trabalho, a massa específica decresce com o aumento do teor de umidade.

Os intervalos de variação da massa específica do trigo, referentes às três variedades e a cada valor de teor de umidade, podem ser observados na Fig. 3. A massa das amostras variou entre 0,37 e 0,48 kg, e os valores de massa específica variaram no intervalo entre 666 a 873 kg m^{-3} . Nas amostras com teor de umidade de 22% b.u., a diferença entre os maiores e menores valores de massa específica, nas três variedades, foi de, aproximadamente, 14%. DeVoe et al. (1985) afirmam que podem ocorrer variações de até 8% na massa específica do produto que escoia em um secador de fluxo contínuo. Portanto, acredita-se

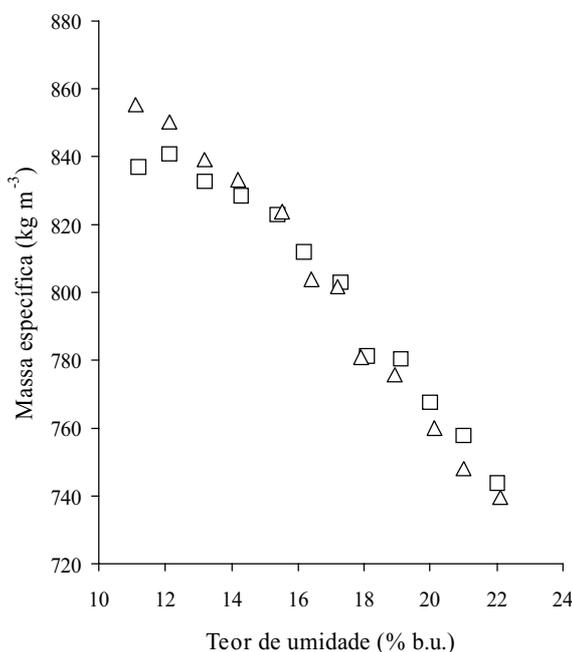


FIG. 2. Variação da massa específica aparente do trigo em função do teor de umidade, para as variedades Mercia (□) e Hereward (△), a 24°C.

que os intervalos de variação de massa específica obtidos neste trabalho representam, com boa margem de segurança, as situações encontradas na prática de secagem de grãos.

Determinação do teor de umidade utilizando-se a permissividade relativa medida simultaneamente em duas frequências

Utilizando-se o método proposto por McFarlane (1987) e fazendo-se regressões múltiplas com os valores de permissividade relativa, ϵ' , teor de umidade, U, e massa específica aparente, ρ , obtiveram-se equações do tipo $U = F(\epsilon', \rho)$ e $\rho = F(\epsilon', U)$ para oito frequências selecionadas no intervalo entre 500 kHz e 5 MHz (Tabela 1). Tais equações foram obtidas utilizando-se valores de teor de umidade no intervalo de 13,0 a 22,1% b.u. As análises de regressão também revelaram que, para o intervalo de frequências estudado, a permissividade relativa é função linear do teor de umidade e da massa específica do trigo. Observou-se também a ocorrência de

relações lineares entre as raízes quadrada e cúbica da permissividade relativa e os valores de teor de umidade e massa específica. Porém, os coeficientes de correlação obtidos para os modelos quadrático e cúbico foram praticamente os mesmos obtidos com o valor inalterado de ϵ' . Por exemplo, na frequência de 5 MHz, obtiveram-se as equações apresentadas a seguir, todas com $r^2 = 0,96$. Os resultados revelam que apenas 4% da variação de ϵ' não podem ser explicados pelas variações no teor de umidade e massa específica das amostras.

$$\epsilon' = 0,236 U + 0,0102 \rho - 6,785; \tag{5}$$

$$(\epsilon')^{1/2} = 0,0517 U + 0,00223 \rho - 0,351; \tag{6}$$

$$(\epsilon')^{1/3} = 0,0262 U + 0,00113 \rho + 0,399. \tag{7}$$

Os resultados mostrados na Tabela 1 também revelam que os maiores coeficientes de correlação para

TABELA 1. Equações que relacionam a permissividade elétrica relativa (ϵ'), o teor de umidade, 13,0% \leq U \leq 22,1%, e a massa específica aparente, ρ (kg m⁻³), de amostras de trigo, variedades Mercia e Hereward, para diversos valores de frequência e temperaturas de 21°C a 24°C.

Frequência (MHz)	Equações	r ²
0,5	$U = 1,981\epsilon' - 0,0301\rho + 28,328$	0,98
	$\rho = 55,995\epsilon' - 29,626U + 939,700$	0,92
0,6	$U = 2,128\epsilon' - 0,0311\rho + 28,460$	0,98
	$\rho = 59,125\epsilon' - 28,995U + 916,977$	0,93
0,7	$U = 2,256\epsilon' - 0,0319\rho + 28,560$	0,98
	$\rho = 61,748\epsilon' - 28,466U + 898,115$	0,93
0,8	$U = 2,368\epsilon' - 0,0327\rho + 28,705$	0,98
	$\rho = 63,900\epsilon' - 27,981U + 882,018$	0,94
0,9	$U = 2,460\epsilon' - 0,0334\rho + 28,868$	0,98
	$\rho = 65,352\epsilon' - 27,506U + 869,441$	0,94
1,0	$U = 2,551\epsilon' - 0,0340\rho + 28,904$	0,98
	$\rho = 67,285\epsilon' - 27,232U + 857,149$	0,94
2,0	$U = 3,214\epsilon' - 0,0384\rho + 29,520$	0,98
	$\rho = 77,846\epsilon' - 24,711U + 777,160$	0,96
5,0	$U = 4,057\epsilon' - 0,0436\rho + 30,121$	0,99
	$\rho = 88,914\epsilon' - 22,154U + 698,440$	0,97

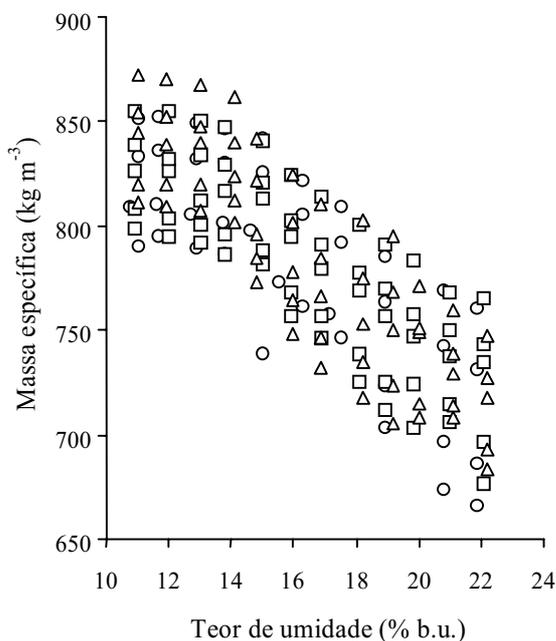


FIG. 3. Intervalos de variação da massa específica aparente em função do teor de umidade, para temperaturas entre 21°C e 24°C, para as variedades Mercia (□), Hereward (Δ) e Hussar (○).

as funções do tipo $\rho = F(\epsilon', U)$ foram obtidos para os maiores valores de frequência. Além disso, considerando-se que para dada alteração no valor do teor de umidade, as correspondentes alterações no valor de ϵ' são maiores no intervalo de baixas frequências, foram escolhidas as funções $\rho = F(\epsilon', U)$ a 5 MHz e $U = F(\epsilon', \rho)$ a 0,5 MHz, para integrar o modelo da medição simultânea de ϵ' em duas frequências. Incorporando-se, então, a função $\rho = F(\epsilon'_{5 \text{ MHz}}, U)$ na função $U = F(\epsilon'_{0,5 \text{ MHz}}, \rho)$, obtve-se a seguinte equação de calibração para o cálculo do teor de umidade do trigo que é, teoricamente, independente da massa específica da amostra:

$$U = 5,949 \epsilon'_{0,5 \text{ MHz}} - 8,036 \epsilon'_{5 \text{ MHz}} + 21,937. \quad (8)$$

Para testar a exatidão da Equação (8) no cálculo do teor de umidade do trigo, utilizaram-se valores de permissividade relativa obtidos com amostras das variedades Mercia e Hereward, e os resultados foram comparados com os valores de teor de umidade determinados pelo método-padrão de estufa. Apesar dos valores elevados dos coeficientes de correlação das funções originais, observou-se que a combinação dessas funções não resulta em um modelo confiável para o cálculo do teor de umidade que seja independente da massa específica da amostra. O desvio-padrão das diferenças entre os valores medidos e estimados do teor de umidade foi de 0,7 ponto percentual, e a diferença máxima chegou a 1,6 pontos percentuais. Esses resultados indicam que a combinação de duas equações não é um procedimento adequado para obtenção de um modelo que permita a determinação do teor de umidade do trigo com o grau de exatidão exigido em práticas pós-colheita. Apesar disso, para efeitos comparativos, utilizou-se a Equação (8) para calcular o teor de umidade de amostras da variedade Hussar. O desvio-padrão das diferenças entre os valores medidos e estimados do teor de umidade foi de 1,2 ponto percentual, e a diferença máxima foi de 2,7 pontos percentuais.

A inclusão de valores de permissividade relativa obtidos para amostras da variedade Hussar com valores de massa específica muito diferentes dos utilizados na derivação da equação de calibração iria comprometer ainda mais os resultados apresentados anteriormente. Por essa razão, esses valores não fo-

ram utilizados na análise de verificação da equação. Por exemplo, os valores de massa específica para as variedades de calibração, Mercia e Hereward, com teor de umidade de 21% b.u., variaram no intervalo $702 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho \leq 770 \text{ kg m}^{-3}$, ao passo que o intervalo de variação da massa específica para amostras da variedade de verificação Hussar, para o mesmo teor de umidade, foi de $674 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho \leq 769 \text{ kg m}^{-3}$. Desta forma, para a variedade Hussar, apenas as amostras com massa específica superior a 702 kg m^{-3} tiveram o teor de umidade estimado pela equação de calibração.

Devido ao fato de, estatisticamente, o método semi-empírico utilizado para solução de expressões analíticas por separação de variáveis não ser rigoroso, optou-se por relacionar o teor de umidade das amostras diretamente, por meio de regressão linear, aos valores de permissividade relativa medidos nas duas frequências utilizadas anteriormente, obtendo-se a seguinte equação, com coeficiente de correlação igual a 0,94:

$$U = 5,655 \epsilon'_{0,5 \text{ MHz}} - 7,231 \epsilon'_{5 \text{ MHz}} + 19,607. \quad (9)$$

Utilizou-se, então, a Equação (9) para estimar o teor de umidade de amostras de trigo das variedades Mercia e Hereward, e os resultados são mostrados na Fig. 4, onde se vê o gráfico de correspondência entre valores experimentais e estimados de teor de umidade. Nesta figura, a linha contínua representa a correspondência ideal entre esses dois valores. O erro-padrão de calibração (EPC) foi de 0,7 ponto percentual. O erro ou desvio-padrão de calibração é uma indicação do grau de distanciamento dos valores de teor de umidade determinados pelo método-padrão de estufa em relação aos valores estimados pela equação de calibração, e é calculado da seguinte maneira:

$$\text{EPC} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n e_i^2 \right) / (n - p - 1)} \quad (10)$$

em que e_i representa a diferença entre os teores de umidade obtidos em estufa e os estimados pela equação de calibração, p representa o número de variáveis independentes utilizadas no modelo de regressão múltipla, e n é o número de amostras usadas na

calibração (Jarret & Kraft, 1989; Lawrence & Nelson, 1993).

A seguir, utilizou-se a equação de calibração (9) para calcular o teor de umidade de amostras de trigo da variedade Hussar, e os resultados são apresentados na Fig. 5, onde se vê o gráfico de correspondência entre valores experimentais e estimados de teor de umidade. O erro-padrão de predição (EPP) e o erro máximo foram de 1,1 e 2,8 pontos percentuais, respectivamente. O erro-padrão de predição representa o desvio-padrão das diferenças entre os valores de teor de umidade determinados em estufa e os estimados pela equação de calibração, utilizando-se os dados da variedade de verificação (Hussar), e é calculado utilizando-se a seguinte equação, em que \bar{e} representa o valor médio dessas diferenças:

$$EPP = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1} \right)} \quad (11)$$

Observa-se que não houve uma melhora sensível nos resultados quando o desempenho da Equação (9) é comparado ao da Equação (8). A avaliação preliminar do desempenho de equações obtidas de maneira semelhante, utilizando-se porém um maior intervalo de teor de umidade, $11\% \leq U \leq 22\%$, resultou em valores ainda menos convincentes dos erros-padrão de calibração e predição. A utilização da massa específica como variável dependente resultou na equação apresentada a seguir, com coeficiente de correlação igual a 0,99. Esse resultado mostra que a massa específica tem influência significa-

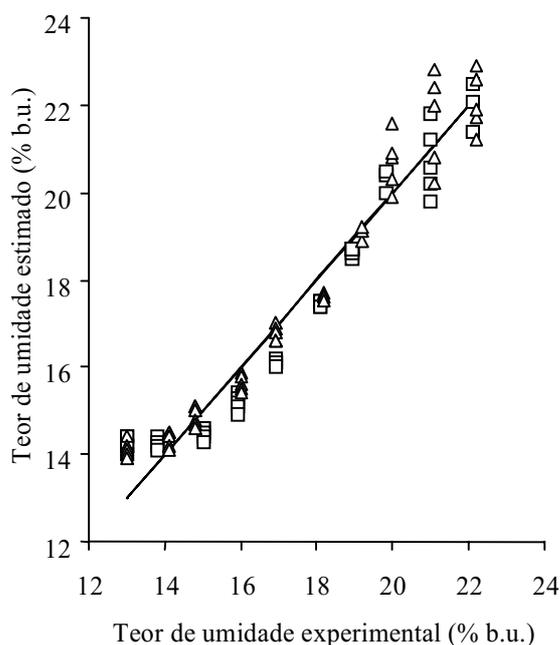


FIG. 4. Gráfico de correspondência entre os valores de teores de umidade determinados pelo método-padrão de estufa e aqueles estimados pela Equação (9), para amostras de trigo das variedades Mercia (□) e Hereward (Δ).

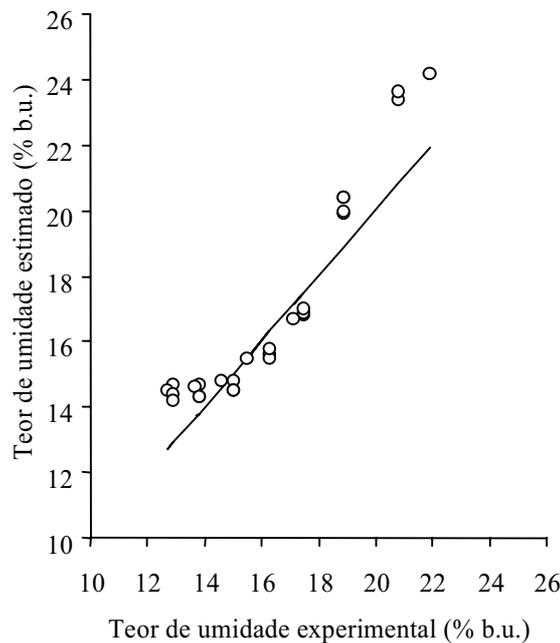


FIG. 5. Gráfico de correspondência entre os valores de teores de umidade determinados pelo método-padrão de estufa e aqueles estimados pela Equação (9), para amostras de trigo da variedade de verificação Hussar.

tiva quando se tenta estimar o teor de umidade de amostras do trigo por meio da medição simultânea da permissividade relativa em duas frequências:

$$U = 0,291 \epsilon'_{0,5 \text{ MHz}} + 3,469 \epsilon'_{5 \text{ MHz}} - 0,0416 \rho + 29,798. \quad (12)$$

Determinação do teor de umidade utilizando-se a permissividade relativa e o fator de perda dielétrica medidos simultaneamente em duas frequências

Stetson & Nelson (1972) 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) afirmou que a predominância de medidores elétricos de teor de umidade 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 variedade ou mesmo para lotes de diferentes variedades. No entanto, Lawrence & Nelson (1993) revelaram que, devido à linearidade entre $\ln(\epsilon'')$ 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 umidade. Os resultados obtidos no presente trabalho para as variedades Mercia e Hereward revelaram que, de fato, o valor de $\ln(\epsilon'')$ é um bom indicador da quantidade de água presente no trigo em frequências de 0,5, 1,0 e 5,0 MHz. Mostra-se, na Fig. 6, a variação de $\ln(\epsilon'')$ em função da massa de água presente nas amostras destas duas variedades de trigo a 5,0 MHz. As retas de mínimos quadrados que se ajustam ao conjunto de valores tiveram coeficientes de correlação de 0,94 e 0,96, para frequências de 0,5 e 5,0 MHz respectivamente. Concluiu-se então que o valor de $\ln(\epsilon'')$ também seria um bom indicador do teor de umidade do trigo. Assim, obteve-se a seguinte equação para o cálculo do seu teor de umidade no intervalo $13,0\% \leq U \leq 22,1\%$, utilizando-se duas propriedades dielétricas, ϵ' e ϵ'' , de

amostras das variedades Mercia e Hereward, para duas frequências de oscilação do campo elétrico, 0,5 e 5,0 MHz:

$$U = 0,663 \epsilon'_{0,5 \text{ MHz}} + 1,715 \ln(\epsilon'')_{0,5 \text{ MHz}} - 2,820 \epsilon'_{5 \text{ MHz}} + 4,769 \ln(\epsilon'')_{5 \text{ MHz}} + 30,437. \quad (13)$$

A Equação (13) tem um coeficiente de correlação igual a 0,98, e os erros-padrão de calibração e predição foram de 0,4 e 0,5 ponto percentual, respectivamente. Esses resultados demonstram que o desempenho da equação de calibração torna-se realmente superior quando foram incluídos os valores de $\ln(\epsilon'')$ na análise de regressão. O desempenho da Equação (13) no cálculo do teor de umidade de amostras das variedades de calibração, Mercia e Hereward, e da variedade de calibração Hussar, é mostrado graficamente nas Figs. 7 e 8, respectivamente.

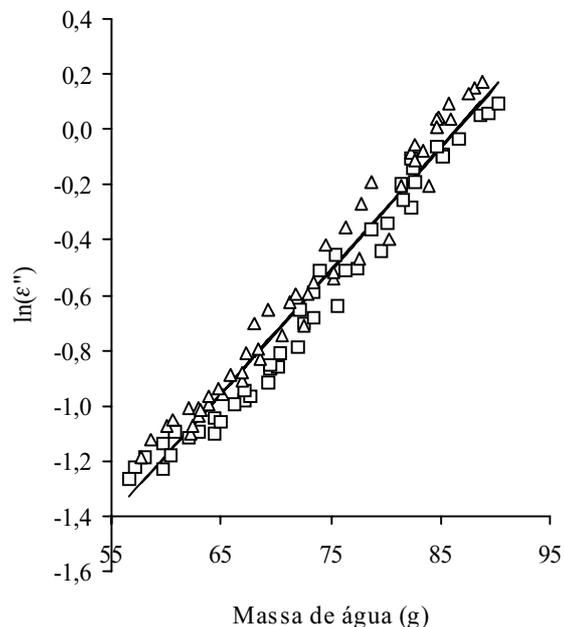


FIG. 6. Variação da massa de água presente em amostras de trigo em função do logaritmo neperiano do fator de perda dielétrica $[\ln(\epsilon'')]$, a 5 MHz, para as variedades Mercia (\square) e Hereward (Δ).

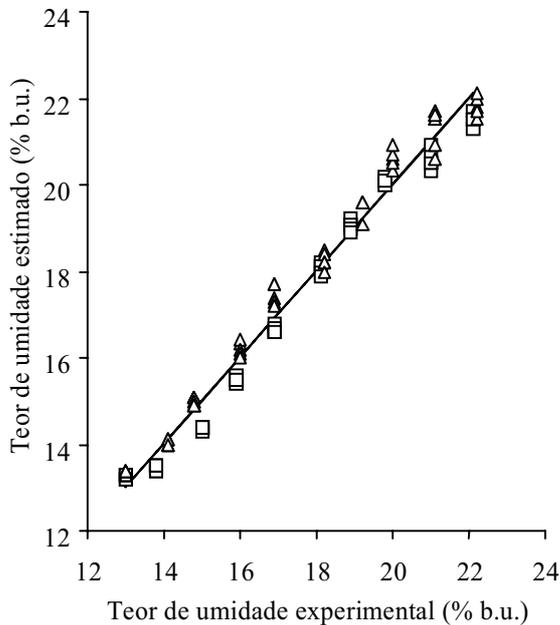


FIG. 7. Gráfico de correspondência entre os valores de teores de umidade determinados pelo método-padrão de estufa e os estimados pela Equação (13), para amostras de trigo das variedades Mercia (□) e Hereward (Δ).

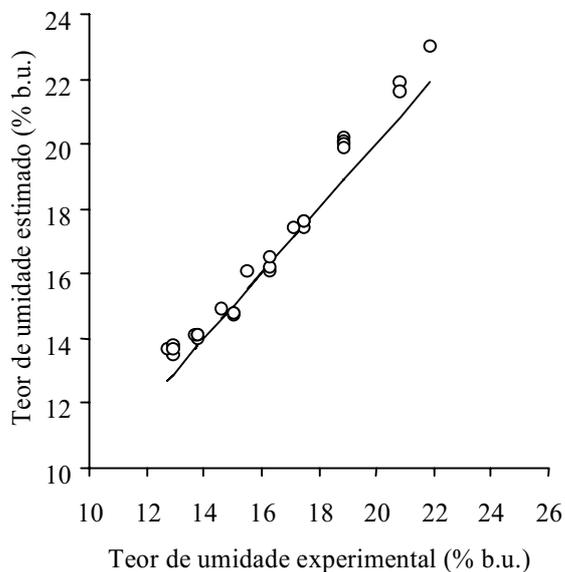


FIG. 8. Gráfico de correspondência entre os valores de teores de umidade determinados pelo método-padrão de estufa e os estimados pela Equação (13), para amostras de trigo da variedade de verificação Hussar.

CONCLUSÕES

1. O método proposto por McFarlane não permite a obtenção de um modelo para o cálculo do teor de umidade do trigo que seja independente da massa específica aparente dos grãos.
2. A inclusão do valor de $\ln(\epsilon'')$ como covariável contribuiu para melhorar o desempenho do modelo.
3. Os erros-padrão de calibração e predição da equação resultante são de 0,4 e 0,5 ponto percentual, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- BERBERT, P.A. **On-line density-independent moisture content measurement of hard winter wheat using the capacitance method**. Silsoe: Cranfield University, 1995. 227p. Tese de Doutorado.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **British standard methods of test for cereals and pulses**. Part 3. Determination of moisture content of cereals and cereal products (routine method). Londres, 1987. 3p. (BS 4317).
- DeVOE, D.R.; BRUSEWITZ, G.H.; STONE, M.L. **Quantitative importance of bulk density when using dielectric measurements to predict percent moisture of hard red winter wheat**. St Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, 1985. 9p. (ASAE Paper 85-3027).
- DZHEMELLA, V.V.; PUSTYNNIKOV, V.G. Two-parameter instrument for automatic measurement of moisture content in corn. **Instrument Construction**, v.7, p.32-34, 1965.
- JARRET, J.; KRAFT, A. **Statistical analysis for decision making**. Boston: Allyn and Bacon, 1989. 712p.
- KINNEY, G.F. **Engineering properties and applications of plastics**. New York: John Wiley & Sons, 1961. 278p.
- KRASZEWSKI, A. Microwave monitoring of moisture content in grain - further considerations. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v.23, n.4, p.236-246, 1988.
- LAWRENCE, K.C.; NELSON, S.O. Radio-frequency density-independent moisture determination in wheat. **Transactions of the ASAE**, v.36, n.2, p.477-483, 1993.

- MATHES, K.N. Electrical properties. In: KROSCWITZ, J.I. (Ed.). **Electrical and electronic properties of polymers: a state-of-the-art compendium**. New York: John Wiley & Sons, 1988. p.101-181.
- McFARLANE, N.J.B. **Two-frequency capacitance measurement of the moisture content of grain**. Silsoe: AFRC Institute of Engineering Research, 1987. 12p.
- NELSON, S.O. Use of electrical properties for grain-moisture measurement. **Journal of Microwave Power**, v.12, n.1, p.67-72, 1977.
- STETSON, L.E.; NELSON, S.O. Audiofrequency dielectric properties of grain and seed. **Transactions of the ASAE**, v.15, n.1, p.180-184, 188. 1972.