

METODOLOGIA E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

UTILIZAÇÃO DE FUNÇÃO DIELÉTRICA PARA ESTIMAR O TEOR DE ÁGUA DE SEMENTES DE CAFÉ (1)

PEDRO AMORIM BERBERT (2*,6); MARÍLIA BERBERT MOLINA (3);
VINICIUS DE OLIVEIRA CARLESSO (4); MÁRCIA RAMOS DE OLIVEIRA (5)

RESUMO

O interesse na utilização das propriedades dielétricas de produtos agrícolas granulares tem aumentado devido ao seu potencial para aplicação em novas tecnologias, como a medição contínua do teor de água de grãos e sementes em operações que utilizam o controle automático de processos, como a colheita, secagem e aeração. O procedimento mais eficaz para diminuir os erros que as alterações no fluxo de massa do produto provocam na estimativa do seu teor de água é a derivação de modelos que empregam a permissividade elétrica relativa ϵ' e o fator de perda dielétrica ϵ'' das sementes. Assim, este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo dielétrico a partir da função $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ para determinação indireta e não-destrutiva do teor de água de sementes de café utilizando o método da capacitância no intervalo de radiofrequências. Os testes experimentais foram realizados em 2005, no Laboratório de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Norte Fluminense. Dentre os modelos obtidos, aquele que permitiu estimar o teor de água de sementes de café com melhor grau de acurácia apresentou erro-padrão da estimativa entre 0,2 e 1,2 pontos percentuais e erro máximo entre 0,4 e 2,6 pontos percentuais.

Palavras-chave: sementes, café em pergaminho, teor de água, instrumentação.

ABSTRACT

USE OF A DIELECTRIC FUNCTION FOR DETERMINATION OF COFFEE SEEDS MOISTURE CONTENT

The interest in dielectric properties of grains has been increasing over the years due to their potential utilization in new technologies such as the on-line estimation of moisture content in automatic control of harvest, drying and aeration. The most convenient way of reducing measurement errors caused by fluctuations in grain mass flow rate is the derivation of dielectric models based on the relative permittivity ϵ' and loss ϵ'' of the product. The object of this research work is to develop a dielectric model derived from the function, $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ for indirect and non-destructive on-line moisture content measurement of parchment coffee seeds at radiofrequencies. Experimental tests were conducted during the 2005 year, at the Agricultural Engineering Laboratory of the Northern Rio de Janeiro State University, Brazil. The best-fit model could estimate moisture content with standard errors of estimate in the range from 0.2 to 1.2 percentage points moisture and maximum errors from 0.4 to 2.6, percentage points moisture.

Key words: seeds, parchment coffee, moisture content, instrumentation.

(1) Recebido para publicação em 24 de julho de 2006 e aceito em 11 de outubro de 2007.

(2) Laboratório de Engenharia Agrícola – LEAG, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), 28013-602 Campos dos Goytacazes, RJ. E-mail: pberbert@uenf.br. (*) Autor correspondente.

(3) Laboratório de Biotecnologia – LBT, UENF. E-mail: mberbert@uenf.br

(4) Doutorando com bolsa da CAPES. Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal do CCTA/UENF. E-mail: carlesso@uenf.br

(5) Mestranda com bolsa da UENF. Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal do CCTA/UENF. E-mail: maroli@uenf.br

(6) Com bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq.

1. INTRODUÇÃO

Medidores do teor de água de produtos agrícolas granulares que operam em radiofrequências ou em frequências de microondas estão disponíveis no mercado há vários anos. Aqueles que utilizam sensores capacitivos em frequências de até 20 MHz são geralmente empregados para determinar o teor de água de amostras estáticas do produto em operações de rotina em unidades de manuseio, secagem e armazenamento de sementes. No entanto, para as operações em que há necessidade da estimativa em linha do teor de água de sementes em movimento, como é o caso do controle automático de secadores, tem havido o predomínio, em anos mais recentes, de pesquisas que buscam o desenvolvimento de técnicas de medição que empregam frequências de microondas. A maior vantagem da utilização de medidores que operam neste nível de frequência (GHz) é a eliminação do efeito deletério da condutividade iônica associada a amostras com elevado teor de água, pois, neste caso, não há contato físico entre o produto em movimento e os elementos sensores do medidor, geralmente antenas do tipo Horn; a esta vantagem se deve contrapor o custo mais elevado de circuitos de microondas em relação àqueles em radiofrequências. Por esta razão, mesmo em países onde já existem medidores em linha disponíveis no mercado, ainda há resistência à tecnologia de medição em frequências de microondas (LAWRENCE et al., 1998). Assim, continua havendo demanda por medidores do teor de água de sementes em movimento que operem em radiofrequências e que permitam reduzir ou eliminar o efeito do fluxo de massa e, conseqüentemente, da massa específica aparente, no valor medido.

Desse modo, visando à obtenção de um protótipo de medidor em linha do teor de água de sementes sem a necessidade da retirada de amostras localizadas e que operasse em frequências de rádio, BERBERT (1995) desenvolveu e adaptou diversas metodologias para a estimativa do teor de água de sementes de trigo em movimento. Os resultados revelaram que, com a escolha correta da geometria e arranjo do elemento sensor, do tamanho da amostra e da frequência de oscilação do campo, é possível reduzir o efeito da condutividade iônica, mesmo sob frequências reduzidas. O modelo dielétrico com melhor desempenho foi capaz de estimar o teor de água de uma coluna de sementes de trigo em movimento com erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,3 e 0,8 pontos percentuais b.u. respectivamente.

Para que um protótipo de medidor em linha de teor de água tenha o grau de versatilidade requerido em operações pós-colheita, é necessário o desenvolvimento de elementos sensores que possam

ser calibrados para diversos tipos de produtos agrícolas granulares. No desenvolvimento desse tipo de sensor tem-se empregado a medição da permissividade elétrica relativa ϵ' e do fator de perda dielétrica ϵ'' para estimar a quantidade relativa de água presente em amostras de produtos granulares (KRASZEWSKI e KULINSKI, 1976; MCFARLANE, 1987; LAWRENCE e NELSON, 1993). Em geral, avalia-se tanto a medição apenas de ϵ' como a medição simultânea de ϵ' e ϵ'' em duas frequências de oscilação quanto a medição desses dois parâmetros em uma única frequência. Essas são consideradas as alternativas, além da utilização da técnica de atenuação de raios- γ , para reduzir a influência da massa específica aparente (ρ) no valor calculado do teor de água (U), pré-requisito indispensável no desenvolvimento de medidor em linha do teor de água de produtos agrícolas com graus de exatidão e precisão desejados em operações que empregam o controle automático de processos.

MEYER e SCHILZ (1980) desenvolveram um método para se estimar o teor de água de produtos granulares, independentemente do fluxo de massa da amostra, com base na medição de parâmetros dielétricos em uma única frequência, no intervalo de microondas. Os resultados conseguidos com amostras de trigo e cevada permitiram verificar que o valor da função $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ dependia apenas do teor de água do produto, não havendo interferência de sua massa específica aparente. Verificou-se que a função era unívoca, ou seja, cada valor obtido de $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ correspondia a um único valor de teor de água e este comportamento era válido apenas para frequências superiores a 10 GHz.

Assim, este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar modelos dielétricos a partir da função $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ para determinação indireta do teor de água de sementes de café adaptando, para o intervalo de radiofrequências, o método originalmente proposto por MEYER e SCHILZ (1980) para o cálculo do teor de água de produtos granulados e que utilizava frequências no intervalo das microondas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos em experimentos realizados no Laboratório de Engenharia Agrícola – LEAG, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias – CCTA da Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes (RJ). Todas as medições de propriedades dielétricas foram feitas utilizando-se sementes de café (*Coffea arabica* L.), variedades Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho e Mundo Novo, provenientes da Fazenda Experimental da EPAMIG

localizada em Ponte Nova (MG). O teor de água das sementes dos lotes originais, em torno de 38% b.u., foi reduzido, inicialmente, para 23% b.u. em um secador de leito fixo a 30 °C. Em seguida, os lotes foram subdivididos em amostras de 1 kg que, para manutenção de suas características originais, foram armazenados em embalagens de polietileno em câmara climática a 4 °C. Para se obter amostras com teores de água entre 23% e 11% b.u., com reduções progressivas de um ponto percentual de teor de água, as amostras foram secas, por diferentes períodos de tempo e a 28 °C, em um secador experimental de camada delgada. Depois dos tratamentos de secagem, as amostras foram colocadas em recipientes de vidro hermético e armazenadas a 4 °C por, no mínimo, 15 dias. Durante o período de armazenamento, essas amostras eram revolvidas três vezes ao dia, para permitir maior homogeneidade na distribuição do teor de água entre as sementes. Todas as medições elétricas foram realizadas em ambiente com temperatura de 21 °C e umidade relativa de 63%.

Adotou-se o seguinte procedimento para se determinar o efeito da massa específica aparente no cálculo do teor de água da amostra, a partir de suas propriedades dielétricas. Para se obter valores naturais de massa específica aparente, vertia-se a amostra no cilindro que forma a parte superior da balança de peso hectolítrico e que estava posicionado sobre o capacitor de cilindros concêntricos. Naturalmente, para que isso fosse possível, os diâmetros das duas peças eram aproximadamente o mesmo, ou seja, 85 mm.

Ao se retirar a lâmina que retém a amostra no cilindro, as sementes fluíam e se alojavam no espaço disponível do elemento sensor. Para se obter os demais valores de massa específica aparente vertia-se, inicialmente, a amostra em um funil de alumínio posicionado acima do capacitor; logo a seguir, acionava-se uma válvula com dispositivo de abertura rápida, localizada na extremidade inferior do funil, distante 30 mm do capacitor, permitindo que a amostra fluísse naturalmente. Em todos os casos, o material em excesso era retirado do capacitor com uma régua, mantendo-se as sementes sempre no mesmo nível das extremidades superiores dos eletrodos. Alterando-se o diâmetro de saída do funil (25, 30 e 53 mm) e a distância entre sua extremidade inferior e o capacitor, era possível obterem-se três valores de massa específica aparente. Para se reduzir o valor de r , misturavam-se as amostras de sementes de café com uma quantidade predeterminada de grânulos de poliestireno expandido com diâmetro de aproximadamente 8 mm. A permissividade elétrica relativa do poliestireno, no intervalo entre 1 kHz

e 1 GHz, é igual a 1,017, valor muito semelhante, em termos práticos, à permissividade relativa do ar, $\epsilon'_{ar} = 1,0006$ (GRIFFIN e SKOCHDOPOLE, 1964; KRAUS e CARVER, 1973). O poliestireno é também um material que provoca dissipação de energia extremamente reduzida da onda eletromagnética, apresentando fator de perda dielétrica $\epsilon'' = 0,0001$.

A medição dos parâmetros elétricos das amostras foi feita mediante utilização de 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 utilizando-se voltagem efetiva de 1,0 V_{ef} . Utilizou-se a configuração com quatro pares de terminais para conectar o capacitor ao medidor HP 4285A. Este tipo de conexão minimiza os problemas relacionados com a indutância mútua, as resistências de contato e os ruídos elétricos. Os valores dos dois parâmetros que compõem a permissividade complexa relativa das sementes de café, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, foram obtidos indiretamente, utilizando-se os valores medidos de capacitância e condutância do capacitor, com e sem a amostra entre os eletrodos. Em todas as medições elétricas feitas neste trabalho, utilizou-se o circuito paralelo equivalente do medidor, o qual interpreta o capacitor como parte integrante de uma combinação capacitor-resistor em paralelo. O método empregado no cálculo dos valores da permissividade elétrica relativa das sementes de café ϵ' , e do fator de perda dielétrica ϵ'' , assim como a descrição do capacitor utilizado para conter as amostras durante as medições, encontram-se em BERBERT e STENNING (1999). Para a determinação do teor de água, utilizou-se o método padrão de estufa, 105±3 °C, durante 24 horas, de acordo com as recomendações das regras para análise de sementes (BRASIL, 1992).

Para comprovar se houve alteração no teor de água das amostras durante o processo de medição das propriedades dielétricas, retiraram-se pequenas subamostras, tanto antes quanto depois de cada seqüência de medição, determinando-se seu teor de água. Esse procedimento permitiu verificarem-se alterações inferiores a 0,2 ponto percentual b.u. para todo o intervalo de teor de água avaliado.

Após a conclusão de todas as medições elétricas de determinada amostra, determinava-se sua massa específica aparente por meio de uma balança de peso hectolítrico modelo *Easi-way* fabricada pela *Farm-Tec*, UK. Menções às marcas e aos respectivos modelos de equipamentos, ao longo desse trabalho, não constituem endosso por parte dos autores.

Adaptação, para o intervalo de radiofrequências, do método originalmente proposto para frequências de microondas por MEYER e SCHILZ (1980)

O método desenvolvido por MEYER e SCHILZ (1980) baseia-se na medição simultânea de dois parâmetros dielétricos (ϵ' e ϵ'') em uma única frequência de oscilação do campo eletromagnético, para determinar o teor de água de produtos sólidos granulados, porém, 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 de Meyer e Schilz foi desenvolvido com base na análise dos efeitos da interação de ondas eletromagnéticas com amostras de materiais sólidos granulados contendo água. Esta interação foi descrita utilizando-se a equação que define a permissividade complexa relativa, ou seja, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$.

Um produto sólido úmido pode ser considerado como constituído por duas fases distintas: matéria seca e água. Considera-se a matéria seca, neste contexto, material homogêneo, pois seu efeito sobre o campo elétrico é apenas residual, quando comparado com aquele produzido pela água. Mantendo-se a temperatura e a frequência constantes, a permissividade complexa de um produto granulado úmido varia em função de sua massa específica aparente, ρ , e teor de água, U , de acordo com a seguinte equação:

$$\epsilon = \epsilon(\rho, U) = \epsilon'(\rho, U) - j\epsilon''(\rho, U) \quad (1)$$

Valores obtidos experimentalmente por MEYER e SCHILZ (1980), utilizando sementes de trigo e 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 (F) independentes, desde que se usasse o valor de $(\epsilon' - 1)$ ao invés do valor inalterado de ϵ' . Desta forma, tem-se:

$$(\epsilon' - 1) = F_1(U) F_2(\rho) \quad (2)$$

$$\epsilon'' = F_3(U) F_4(\rho) \quad (3)$$

Caso 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 $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ seria uma quantidade independente da massa específica aparente, ou seja,

$$\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''} = \frac{F_1(U) F_2(\rho)}{F_3(U) F_4(\rho)} \cong \frac{F_1(U)}{F_3(U)} (\text{constante}) = F_5(U) \quad (4)$$

Se as considerações feitas no desenvolvimento da Equação (4) estiverem corretas, a função $F_5(U)$ e, conseqüentemente, a razão $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$, 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.

As análises de regressão múltipla, bem como a estimativa dos parâmetros estatísticos dos modelos dielétricos foram feitas empregando-se o programa *Statistica*TM desenvolvido pela StatSoft, Inc.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Constatou-se, neste trabalho, que a hipótese de MEYER e SCHILZ (1980), ou seja, que a função $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ é independente da massa específica aparente (ρ) de materiais granulares, é verdadeira, em radiofrequências, para sementes de café das variedades Catuaí Amarelo e Vermelho e Mundo Novo, com teor de água variando entre 11% e 23% b.u. e massa específica no intervalo $326 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho \leq 455 \text{ kg m}^{-3}$. Na figura 1, verifica-se o plano complexo, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, para amostras de sementes de café com teores de água de $12,6 \pm 0,2$, $17,5 \pm 0,3$ e $22,8 \pm 0,3\%$ b.u., a 5 MHz, 21 °C e 63% de umidade relativa, para diversos valores de massa específica aparente. As retas de mínimos quadrados, $\epsilon'' = F(\epsilon')$ que se ajustaram ao conjunto de valores, para todo o intervalo de teor de água, tiveram coeficientes de correlação superiores a 0,99. Assim como havia sido observado por KENT (1977) para materiais pulverizados, verificou-se, neste trabalho, que no plano complexo visto na figura 1, o lugar geométrico da permissividade elétrica relativa, ϵ' , em função da massa específica aparente, ρ , 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, $\epsilon' = 1$ e $\epsilon'' = 0$ (KRAUS e CARVER, 1973). Observa-se, na mesma figura, que o ângulo θ , formado pelo eixo das abscissas e por qualquer uma das retas representadas pela função $\epsilon'' = F(\epsilon')$, independe da variação de ρ ; conseqüentemente, o valor de $\text{tg}(\theta)$ também independe da massa específica aparente do produto; no entanto, como $\text{tg}(\theta) = [\epsilon''/(\epsilon' - 1)]$, a razão $[\epsilon''/(\epsilon' - 1)]$, ou o seu recíproco, também são funções que independem da massa específica da amostra, para determinado valor de teor de água e temperatura.

As curvas que representam a variação da relação $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ e o teor de água para amostras de sementes de café das três variedades são mostradas na figura 2. MEYER e SCHILZ (1980) afirmaram que a

univocidade da função $[(\epsilon'-1)/\epsilon''] = F(U)$ só ocorreria para valores de frequência superiores a 10 GHz. No entanto, BERBERT e STENNING (1998) verificaram que, para sementes de trigo, a função é unívoca para valores consideravelmente inferiores de frequência. No presente trabalho, a análise dos resultados experimentais revelou que a função realmente não é unívoca para nenhuma das frequências estudadas entre 75 kHz e 5 MHz. Portanto, para sementes de café, não será possível obter um modelo único, a partir da função de Meyer e Schilz, e que seja independente da massa específica aparente do produto para todo o

intervalo de teor de água estudado. Observa-se ainda na figura 2, que para sementes de café da variedade Mundo Novo, a função $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']_{1 \text{ MHz}}$ representa comportamento e valores notadamente diferentes daqueles obtidos com sementes das demais variedades. Sendo assim, a estimativa do teor de água de sementes de café empregando-se o presente método não poderá ser feita com uma equação geral de calibração obtida a partir dos parâmetros dielétricos de duas das variedades estudadas e que, posteriormente, poderia ser validada com sementes da terceira variedade.

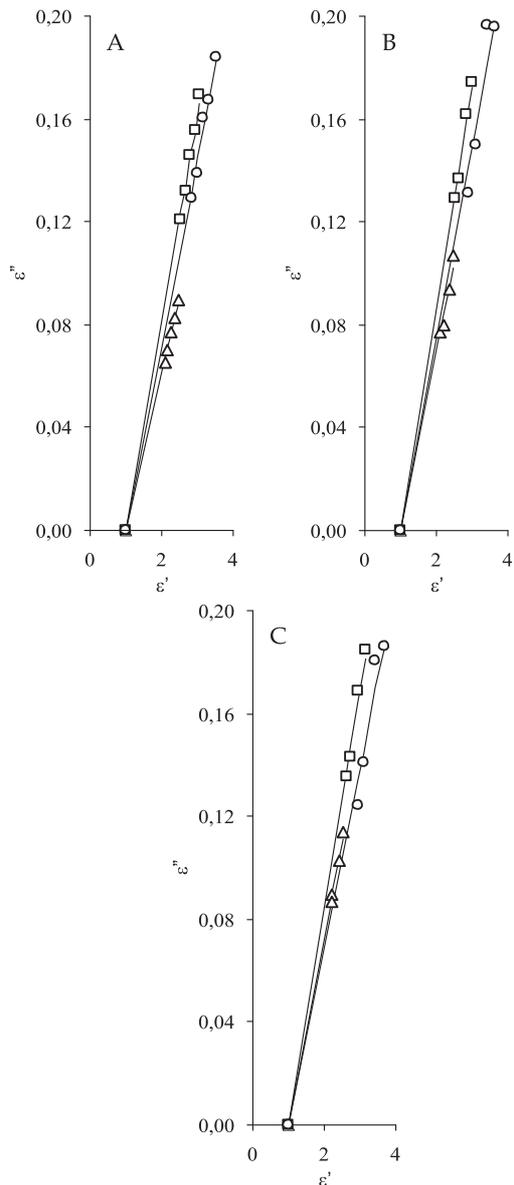


Figura 1. Diagrama do plano complexo mostrando a variação da permissividade, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, a 5 MHz e 21 °C, de amostras de sementes de café, variedades Catuaí Amarelo [A], Catuaí Vermelho [B] e Mundo Novo [C], para diversos valores de massa específica aparente. Δ , 12,6±0,2% b.u.; \square , 17,5±0,3% b.u.; \circ , 22,8±0,3% b.u.

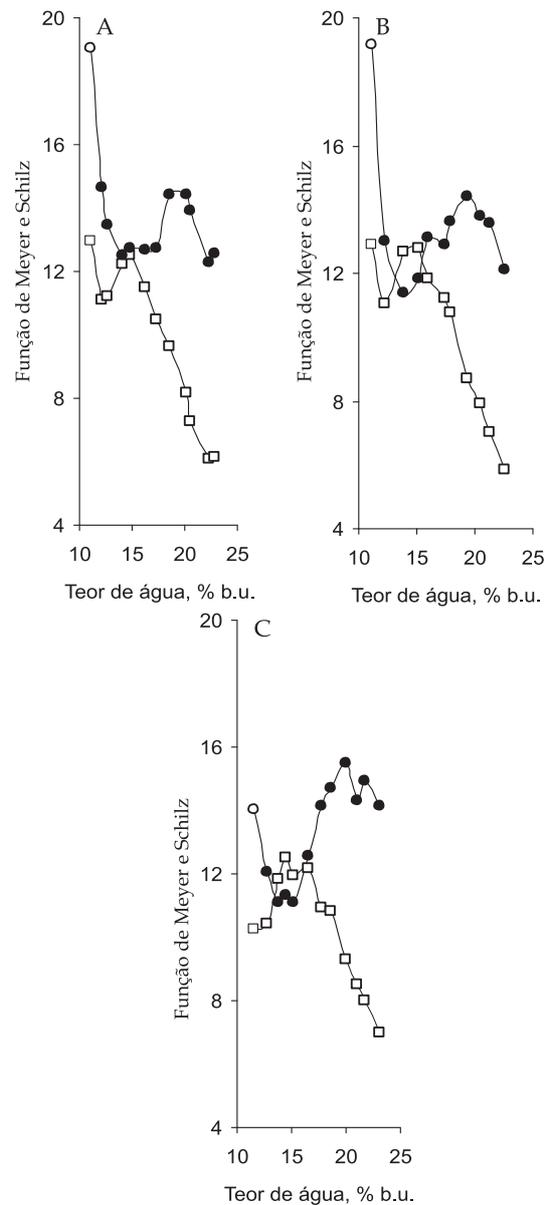


Figura 2. Variação da função de Meyer e Schilz $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$, em função do teor de água, para sementes de café das variedades Catuaí Amarelo [A], Catuaí Vermelho [B] e Mundo Novo [C] e valores indicados de frequência, a 21 °C. \square , 100 kHz; \bullet , 1 MHz.

Desta forma, para sementes de café, a determinação do teor de água empregando-se a função $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ deverá ser feita individualmente para cada variedade e, para tanto, foram escolhidas duas frequências de oscilação, 100 kHz e 1 MHz, para as quais os valores de $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ são unívocos nos intervalos $16\% \text{ b.u.} \leq U \leq 23\% \text{ b.u.}$ e $11\% \text{ b.u.} \leq U \leq 14\% \text{ b.u.}$ respectivamente.

Na figura 3, é possível verificar que os valores de $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ a 1 MHz e 100 kHz são praticamente independentes da massa específica aparente do produto. Assim como foi observado por LAWRENCE e NELSON (1993), as declividades das retas indicadas na figura 3 têm sempre valores negativos e próximos de zero (entre 0,004 e 0,06). O resumo das análises de regressão das curvas mostradas na figura 2, bem como o desempenho dos modelos na estimativa do teor de água de sementes de café, são apresentados na tabela 1, em que $[(\epsilon'-1)/\epsilon''] = G$. Os modelos dielétricos mostrados na tabela 1 foram então utilizados para se estimar o teor de água de amostras de sementes de café e os resultados são mostrados na Figura 4, na qual se vê o gráfico de correspondência entre os valores experimentais e estimados de teor de água. Nesta figura, a linha contínua representa a correspondência ideal entre os dois valores. O valor do erro máximo (2,6 pontos percentuais) foi superior ao valor limite normalmente considerado aceitável para fins de adequação de modelos (1,0 ponto percentual) e a magnitude dos erros-padrão da estimativa (entre 0,2 e 1,2 pontos percentuais), evidencia que o método proposto por MEYER e SCHILZ (1980) proporcionou resultados apenas satisfatórios, em termos de exatidão, no cálculo indireto do teor de água de sementes de café.

LAWRENCE e NELSON (1993) tentaram melhorar o desempenho da função de Meyer e Schilz na predição do teor de água de sementes de trigo ao

introduzirem o quadrado da diferença da função $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ em duas frequências de oscilação (1 e 10 MHz), em combinação com o logaritmo neperiano do fator de perda dielétrica $\ln(\epsilon'')$. Observou-se, daí, que a equação resultante, com $r^2 = 0,97$, permite que se estime o teor de água de sementes de trigo com erro-padrão da estimativa de 0,6 ponto percentual.

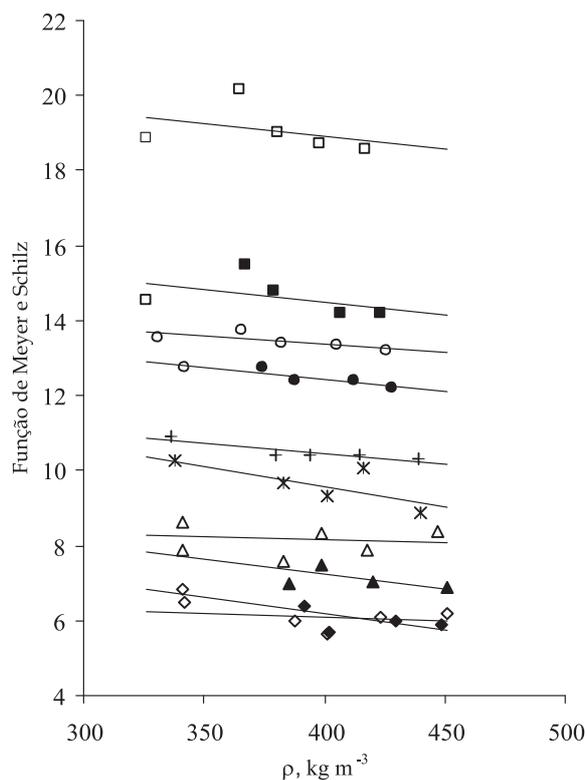


Figura 3. Valores da função de Meyer e Schilz $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ em função da massa específica aparente para amostras de café da variedade Catuaí Amarelo e para valores indicados de teor de água (b.u) e frequência. 1 MHz: ○, 11%; ■, 12%; ○, 13%; ●, 14%. 100 kHz: +, 17%; *, 19%; △, 20%; ▲, 21%; ◇, 22%; ◆, 23%.

Tabela 1. Equações que relacionam o teor de água (U) de sementes de café das variedades Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho e Mundo Novo à função de Meyer e Schilz $\Gamma = [(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ a 100 kHz e 1 MHz

| Variedade | Intervalo de teor de água (% b.u.) | Frequência | U | r^2 | Erro padrão da estimativa* | Erro absoluto máximo* |
|-----------------|------------------------------------|------------|--|--------|----------------------------|-----------------------|
| Catuaí Amarelo | 11 a 14 | 1 MHz | $U = 0,084\Gamma^2 - 3,079\Gamma + 39,273$ | 0,9360 | 0,3 | 0,5 |
| | 16 a 23 | 100 kHz | $U = -1,110\Gamma + 29,151$ | 0,9466 | 0,5 | 1,2 |
| Catuaí Vermelho | 11 a 14 | 1 MHz | $U = 0,090\Gamma^2 - 3,089\Gamma + 37,373$ | 0,9753 | 0,2 | 0,4 |
| | 16 a 23 | 100 kHz | $U = -0,867\Gamma + 27,123$ | 0,8434 | 0,9 | 2,1 |
| Mundo Novo | 11 a 14 | 1 MHz | $U = 0,105\Gamma^2 - 3,341\Gamma + 37,861$ | 0,9360 | 0,3 | 0,5 |
| | 16 a 23 | 100 kHz | $U = -0,878\Gamma + 28,129$ | 0,7133 | 1,2 | 2,6 |

*pontos percentuais de teor de água.

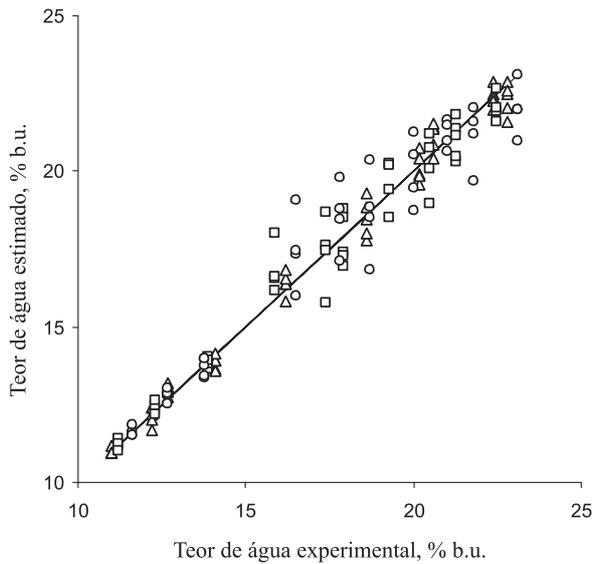


Figura 4. Correspondência entre os valores de teores de água determinados pelo método-padrão de estufa e aqueles estimados pelos modelos dielétricos apresentados na tabela 1, para amostras de sementes de café das variedades Catuaí Amarelo (Δ), Catuaí Vermelho (\square) e Mundo Novo (\circ).

No presente trabalho, empregou-se o modelo dielétrico representado pela Equação (5), de forma similar àquela proposta por LAWRENCE e NELSON (1993); por meio de análises de regressão, para teores de água entre 11% e 23% b.u. e frequências de 100 kHz e 1 MHz, obtiveram-se os modelos apresentados na tabela 2.

A utilização da Equação (5), no cálculo do teor de água de sementes de café, resulta em erro-padrão da estimativa e erro máximo de 1,3 e 3,3 pontos percentuais de teor de água respectivamente. Observa-se, portanto, que o método proposto por LAWRENCE e NELSON (1993) não é efetiva na melhoria do desempenho dos modelos dielétricos de Meyer e Schilz para sementes de café. A Equação (5) foi então empregada para se estimar o teor de água de sementes de café e os resultados são mostrados na figura 5.

$$U = a + b \varepsilon'_{1MHz} + c \ln(\varepsilon''_{100kHz}) + d \left[\left(\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \right)_{100kHz} - \left(\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \right)_{1MHz} \right]^2 \quad (5)$$

Comparando-se os resultados deste trabalho com aqueles obtidos anteriormente por BERBERT e STENNING (1998), é possível verificar-se que o desempenho do modelo dielétrico, derivado a partir do método proposto por Meyer e Schilz, é consideravelmente superior para o trigo que para sementes de café. Para o trigo, a função $[(\varepsilon' - 1)/\varepsilon'']_{1MHz}$ permite estimar o teor de água praticamente independente da massa específica aparente das sementes, com erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,3 e 0,7 ponto percentual respectivamente. É importante ressaltar que, para o trigo, o erro-padrão da estimativa é da mesma ordem de grandeza relacionada à determinação do teor de água por meio de métodos-padrão de estufa, que é de cerca de 0,3 ponto percentual (KRASZEWSKI et al. 1977).

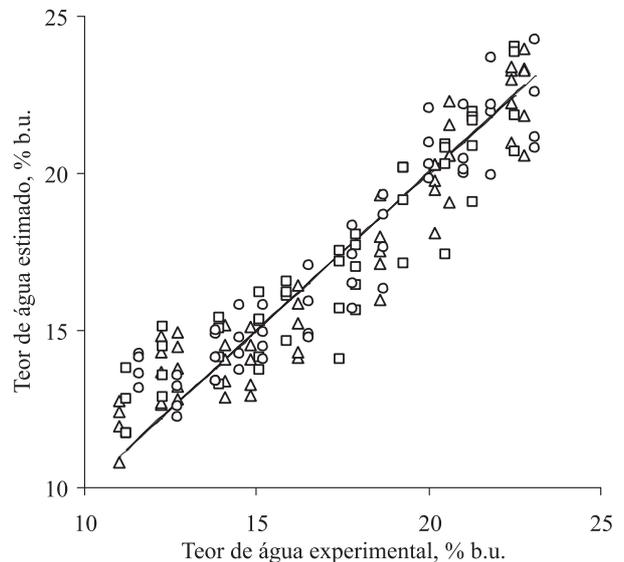


Figura 5. Correspondência entre os valores de teores de água determinados pelo método-padrão de estufa e aqueles estimados pelos modelos dielétricos representado pela Equação (5), para amostras de sementes de café das variedades Catuaí Amarelo (Δ), Catuaí Vermelho (\square) e Mundo Novo (\circ).

Tabela 2. Parâmetros da equação que relaciona o teor de água (U) às propriedades dielétricas de sementes de café das variedades Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho e Mundo Novo, de acordo com o modelo dielétrico representado pela Equação (5)

| Variedade | Parâmetros da equação | | | | r^2 | Erro padrão da estimativa* | Erro absoluto máximo* |
|-----------------|-----------------------|--------|--------|-------|--------|----------------------------|-----------------------|
| | a | b | c | d | | | |
| Catuaí Amarelo | 28,856 | -0,376 | 7,452 | 0,017 | 0,9080 | 1,3 | 2,6 |
| Catuaí Vermelho | 22,260 | 1,024 | 5,757 | 0,019 | 0,8479 | 1,4 | 3,3 |
| Mundo Novo | -9,637 | 6,451 | -3,562 | 0,126 | 0,8812 | 1,3 | 2,6 |

*pontos percentuais de teor de água.

4. CONCLUSÕES

1. A função $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ é independente da massa específica aparente de sementes de café para radiofrequências no intervalo entre 75 kHz e 5 MHz; no entanto, não é unívoca para nenhum dos valores de frequência estudados no intervalo $11\% \text{ b.u.} \leq U \leq 23\% \text{ b.u.}$

2. Dividindo-se em dois o intervalo original de teor de água, a função $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ torna-se unívoca para frequências de 100 kHz ($16\% \text{ b.u.} \leq U \leq 23\% \text{ b.u.}$) e 1 MHz ($11\% \text{ b.u.} \leq U \leq 14\% \text{ b.u.}$). Neste caso, o erro-padrão da estimativa e os erros máximos proporcionados pelos modelos dielétricos são de 0,3 e 0,5 (1 MHz) e 0,5-1,2 e 1,2-2,6 (100 kHz) pontos percentuais b.u. respectivamente.

3. A introdução do quadrado da diferença da função $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ em duas frequências de oscilação, em combinação com o logaritmo neperiano do fator de perda dielétrica $\ln(\epsilon'')$ não melhorou o desempenho do modelo dielétrico. O erro-padrão da estimativa e o erro máximo foram de 1,3 e 3,3 pontos percentuais de teor de água respectivamente.

4. O método originalmente desenvolvido por MEYER e SCHILZ (1980) para frequências de microondas pode ser utilizado, com limitações, para valores de frequência consideravelmente menores (radiofrequências) na estimativa do teor de água de sementes de café.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro das seguintes instituições: CNPq, FAPERJ, FINEP e *International Foundation for Science* IFS.

REFERÊNCIAS

BERBERT, P.A. **On-line density-independent moisture content measurement of hard winter wheat using the capacitance method**. 1995. 227f. Thesis (Ph.D in Agricultural Engineering). Postharvest Technology Department, Cranfield University, Silsoe, 1995.

BERBERT, P.A.; STENNING, B.C. Determinação do teor de umidade de sementes de trigo por meio da medição simultânea de dois parâmetros dielétricos em uma única frequência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.3, p.329-334, 1998.

BERBERT, P.A.; STENNING, B.C. Redução da influência da massa específica na determinação do teor de água de sementes de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.4, p.641-650, 1999.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 1992. 365p.

GRIFFIN, J.D.; SKOCHDOPOLE, R.E. Plastic foams. In: BAER, E. **Engineering design for plastics**. New York: Reinhold Publishing, 1964. p.995-1071. (Polymer Science and Engineering Series)

KENT, M. Complex permittivity of fish meal: a general discussion of temperature, density and moisture dependence. **Journal of Microwave Power**, Clifton, v.12, p.341-5, 1977.

KRASZEWSKI, A.; KULINSKI, S. An improved microwave method of moisture content measurement and control. **IEEE Transactions on Industrial electronics and control instrumentation**, IECI, St. Paul, v.23, n.4, p.364-370, 1976.

KRASZEWSKI, A.W. et al. A preliminary study on microwave monitoring of moisture content in wheat. **Journal of Microwave Power**, Clifton, v.12, n.3, p.241-52, 1977.

KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. **Electromagnetics**. 2.nd ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1973. 828p.

LAWRENCE, K. C.; NELSON, S. O. Radio-frequency density-independent moisture determination in wheat. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Paul, v.36, n.2, p.477-483, 1993.

LAWRENCE, K.C. et al. Coaxial dielectric sensor for cereal grains. In: IEEE INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 1998, St. Paul. **Proceedings...** St. Paul: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998. p.541-546.

McFARLANE, N.J.B. **Two-frequency capacitance measurement of the moisture content of grain**. Silsoe: AFRC Institute of Engineering Research, 1987. 12p.

MEYER, W.; SCHILZ, W. A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids. **Journal of Physics D: Applied Physics**, Bristol, v.13, p.1823-30, 1980.