

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA DE SEMENTES DE CAFÉ EMPREGANDO O MÉTODO DA CAPACITÂNCIA EM RADIOFREQUÊNCIAS¹

PEDRO AMORIM BERBERT², MARÍLIA AMORIM BERBET MOLINA³, VINICIUS OLIVEIRA CARLESSO⁴, MÁRCIA TEREZINHA RAMOS OLIVEIRA⁵

RESUMO – O desenvolvimento de modelos matemáticos que correlacionem a permissividade elétrica relativa ϵ' e o fator de perda dielétrica ϵ'' à quantidade de água presente em amostras de sementes é um passo fundamental no desenvolvimento de medidores em linha do teor de água que possam ser empregados no controle automático de processos como colheita, secagem e aeração. Esse trabalho consistiu na avaliação de três modelos dielétricos para determinação do teor de água de sementes de café, sem a influência do fluxo de massa. Foram utilizadas amostras das variedades Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho e Mundo Novo, com teores de água entre 11 e 23% b.u. e massa específica aparente no intervalo $326 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho \leq 455 \text{ kg m}^{-3}$. Dos modelos obtidos, apenas aquele que utiliza a medição simultânea de ϵ' e ϵ'' , a 0,5 e 5,0 MHz, permite estimar o teor de água de sementes de café com o grau de acurácia desejado. Os erros padrão de calibração e predição foram de 1,3 e 1,2 pontos percentuais, respectivamente.

Termos para indexação: *Coffea arabica*, umidade, propriedades dielétricas, instrumentação.

MOISTURE DETERMINATION IN COFFEE SEEDS BY THE CAPACITANCE METHOD AT RADIOFREQUENCIES

ABSTRACT – The development of mathematical models capable of relating the relative permittivity ϵ' and the loss factor ϵ'' of seeds to their moisture content is a fundamental step towards designing seed moisture meters for on-line operations in automatic control processes such as seed harvest, drying and aeration. The object of this research is the assessment of three dielectric models that would allow the density-independent determination of the moisture content of moving seeds of parchment coffee. Seed samples of varieties *Catuaí Amarelo*, *Catuaí Vermelho* and *Mundo Novo* with moisture contents in the range from 11 to 23% w.b., and bulk density ranging from 326 to 455 kg.m^{-3} have been used. In terms of instrumentation accuracy the best bulk-density dielectric model for coffee seeds moisture content estimation was the one which employed both ϵ' and ϵ'' measured at 0.5 and 5.0 MHz as indicators of the amount of water present in the seed samples. The standard errors of calibration and prediction were 1.3 and 1.2 percentage points moisture, respectively

Index terms: *Coffea arabica*, moisture content, dielectric properties, instrumentation.

INTRODUÇÃO

Modelos dielétricos para a determinação do teor de água de produtos agrícolas, como sementes de cereais, oleaginosas

e café, são aqueles em que o teor de água é determinado indiretamente por meio da medição de propriedades dielétricas de amostras desses produtos, como a permissividade elétrica relativa ϵ' e o fator de perda dielétrica ϵ'' . Esses dois parâmetros

¹ Submetido em 14/06/2006. Aceito para publicação em 20/03/2007. Trabalho financiado pelo CNPq, FAPERJ, FINEP e IFS

² Eng. Agrícola, Ph.D., Professor Associado, Laboratório de Engenharia Agrícola – LEAG, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), CEP 28013-602 Campos dos Goytacazes, RJ. mail: pberbert@uenf.br

³ Eng. de Alimentos, D.S., Professor Associado, Laboratório de Biotecnologia

– LBT, UENF, mberbert@uenf.br

⁴ Eng Agrônomo, M.S., LEAG, Doutorando do Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal do CCTA/UENF. carlesso@uenf.br

⁵ Tecnóloga em Horticultura, Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal do CCTA/UENF. maroli@uenf.br

constituem, respectivamente, as partes real e imaginária da equação que define a permissividade complexa relativa, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = |\epsilon| \epsilon^{-j\delta}$, em que δ representa o ângulo de perdas do dielétrico (Trabelsi et al., 1998).

A permissividade elétrica relativa ϵ' é uma das propriedades fundamentais da matéria e está relacionada à capacidade que o dielétrico, no presente caso, uma amostra de sementes de determinada espécie, possui de aumentar a capacitância de um capacitor, quando inserido entre suas placas, ou seja, é uma medida do grau de facilidade com que o material permite o estabelecimento de um campo elétrico em seu interior. O fator de perda dielétrica ϵ'' está associado à quantidade de energia dissipada pela amostra de sementes, quando submetida a um circuito de corrente alternada de alta frequência. Tanto ϵ' quanto ϵ'' podem ser adequados indicadores do teor de água, dependendo do tipo de material e da frequência de oscilação do campo elétrico empregado nas medições (Nelson, 1998).

Os medidores de teor de água com sensores capacitivos existentes no mercado operam em radiofrequências e medem a capacitância de amostras estáticas de sementes de massa ou volume conhecido. Sua calibração é feita a partir de certa relação funcional, dificilmente disponibilizada pelos fabricantes, entre o teor de água medido pelo método padrão da estufa e determinada resposta elétrica do sensor. Embora esses medidores que operam com amostras estáticas sejam adequados para aplicações de rotina em unidades de secagem e beneficiamento, eles não são apropriados para aplicações que empregam controle automático e que requerem a avaliação contínua do teor de água de uma massa de sementes em movimento, porque as variações na massa específica aparente (r) resultariam em significativos erros de medição.

A maioria dos medidores de teor de água que se baseia no método da capacitância utiliza, indiretamente, a relação entre a quantidade de água presente nas sementes e sua permissividade elétrica relativa ϵ' . Esta variação de ϵ' com o teor de água da amostra permitiu o desenvolvimento de medidores elétricos baseados no método da capacitância. O valor da permissividade elétrica de grãos secos varia no intervalo $2 \leq \epsilon' \leq 5$, ao passo que ϵ' (H_2O) $\cong 80$, a 25 °C (Kraus e Carver, 1973; Kaatze, 1996). Desta forma, pequenos incrementos da quantidade de água presente nas sementes resultam em um aumento considerável no valor de ϵ' . Diversos fatores, além do teor de água, afetam o valor da permissividade elétrica relativa dos materiais em geral, e das sementes em particular, dentre os quais se podem citar: frequência de oscilação do campo elétrico, temperatura, massa específica

aparente, composição química, variedade, ciclos de sorção-dessorção, tamanho das sementes e condutividade iônica. Sendo assim, no desenvolvimento de sensores para estimar o teor de água de sementes em movimento, é imprescindível que essas variáveis sejam medidas ou controladas. Portanto, mesmo que se conheça a frequência em que deve operar o aparelho medidor e que seja possível corrigir o efeito da temperatura e reduzir a influência da condutividade iônica, ainda restariam o teor de água e a massa específica aparente como principais variáveis desconhecidas. Desta forma e de acordo com Lawrence et al. (1998), um medidor que faz uma única medida de capacitância do elemento sensor preenchido com a amostra de sementes, seria incapaz de estimar o teor de água de sementes em movimento, por se tratar de um sistema indeterminado.

Vários métodos têm sido propostos para reduzir ou eliminar o efeito da massa específica na determinação em linha do teor de água de produtos agrícolas. As soluções encontradas baseiam-se, em geral, na obtenção de modelos empíricos envolvendo propriedades dielétricas do produto e que sejam independentes do fluxo de massa ($kg\ s^{-1}\ m^{-2}$), uma vez que seria praticamente impossível controlar a massa específica de sementes em movimento (Berbert et al., 1999). Dentre esses métodos citam-se o modelo proposto por McFarlane (1987) para radiofrequências e os modelos desenvolvidos para frequências de microondas, pelos pesquisadores Kraszewski e Kulinski (1976), Meyer e Schilz (1980), Kress-Rogers e Kent (1987), Powell et al. (1988), Lawrence e Nelson (1993), Zhang e Okamura (2001) e Trabelsi et al. (2001). Análises detalhadas do desempenho da maioria desses modelos na determinação do teor de água do trigo foram realizadas por Berbert (1995). Cada um desses modelos apresenta sua própria peculiaridade em termos de desempenho, podendo ser usados em circunstâncias específicas apropriadas (intervalos de teor de água, massa específica aparente e frequência de oscilação do campo elétrico). Em geral, para sementes de trigo foi possível estimar-se o teor de água entre 11 e 22% b.u., com erro padrão de calibração entre 0,3 e 0,7 ponto percentual e erro padrão de predição entre 0,4 e 1,2 pontos percentuais. Após a medição das propriedades dielétricas de sementes de café (Berbert et al., 2001), o próximo passo, para se projetar e construir um medidor em linha do teor de água, é a derivação e análise de modelos que utilizem essas propriedades intrínsecas das sementes e que sejam independentes do seu fluxo de massa ou da sua massa específica aparente. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar a adequação dos métodos propostos por Kraszewski

e Kulinski (1976), McFarlane (1987) e Lawrence e Nelson (1993) na determinação em linha do teor de água de sementes de café.

MATERIALE MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) da Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro, UENF, Campos dos Goytacazes, RJ. Em todas as medições de propriedades dielétricas utilizaram-se sementes de café (*Coffea arabica* L.) das variedades Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho e Mundo Novo, provenientes da Fazenda Experimental da EPAMIG em Ponte Nova-MG.

O teor de água das sementes dos lotes originais, cerca 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 sacos de polietileno em câmara fria 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 secadas, 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%.

A medição dos parâmetros elétricos das amostras realizou-se mediante utilização de medidor LCR, modelo 4285A, fabricado pela Hewlett-Packard; trata-se de equipamento capaz de medir 12 parâmetros de impedância, $|Z|\epsilon^{i\theta}$, em frequências de teste de 75 kHz a 30 MHz. As propriedades dielétricas foram determinadas utilizando-se voltagem efetiva de 1,0 V_{ef} . Empregou-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. O procedimento empregado para obtenção de diversos níveis de massa específica aparente, para um mesmo valor de teor de água, encontra-se descrito em Berbert et al. (2001).

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. Todas as medições elétricas, neste trabalho, foram feitas através do circuito paralelo equivalente do medidor. Este circuito interpreta o capacitor como parte integrante de uma combinação capacitor-resistor em paralelo. A metodologia empregada 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 de sementes durante as medições, encontram-se em Berbert e Stenning (1999). As descrições dos modelos dielétricos originais que foram adaptados para a estimativa do teor de água de sementes de café encontram-se em Kraszewski e Kulinski (1976), McFarlane (1987) e em Lawrence e Nelson (1993). Para a determinação do teor de água utilizou-se o método padrão de estufa, 105 ± 3 °C, durante 24 h, de acordo com Regras para Análise de Sementes (Brasil, 1992).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mostra-se, nas Figuras 1 e 2, a representação gráfica da variação da permissividade elétrica relativa (ϵ') e do fator de perda dielétrica (ϵ'') de sementes de café das três variedades estudadas, em função da frequência de oscilação do campo, para dois níveis de compactação das sementes e três valores de teor de água (12,6, 17,5 e 22,7% b.u.). Os dados apresentados na Figura 1 referem-se às amostras com os menores valores obtidos de massa específica aparente (sementes não compactadas), ou seja, 334,7, 338,7 e 343,0 $kg.m^{-3}$, para cada um dos teores de água mencionados anteriormente; na Figura 2 encontram-se as variações de ϵ' e ϵ'' correspondentes aos maiores valores de massa específica aparente (sementes compactadas), 409,7, 441,0 e 453,7 $kg.m^{-3}$, para os mesmos teores de água. Assim como já havia sido observado para sementes de trigo (Berbert et al., 1997) e feijão (Berbert et al., 2002), os valores de ϵ' , para todas as variedades e combinações de teor de água e massa específica aparente, diminuíram regularmente com o aumento da frequência. Observa-se, no entanto, que a variação de ϵ'' com a frequência foi menos regular e previsível do que a de ϵ' , principalmente para o valor intermediário de teor de água (17,5 % b.u.).

Verifica-se, também, que a permissividade elétrica relativa das sementes de café da variedade Mundo Novo com teores de água de 12,6 e 17,5% b.u. foi consistentemente maior, em

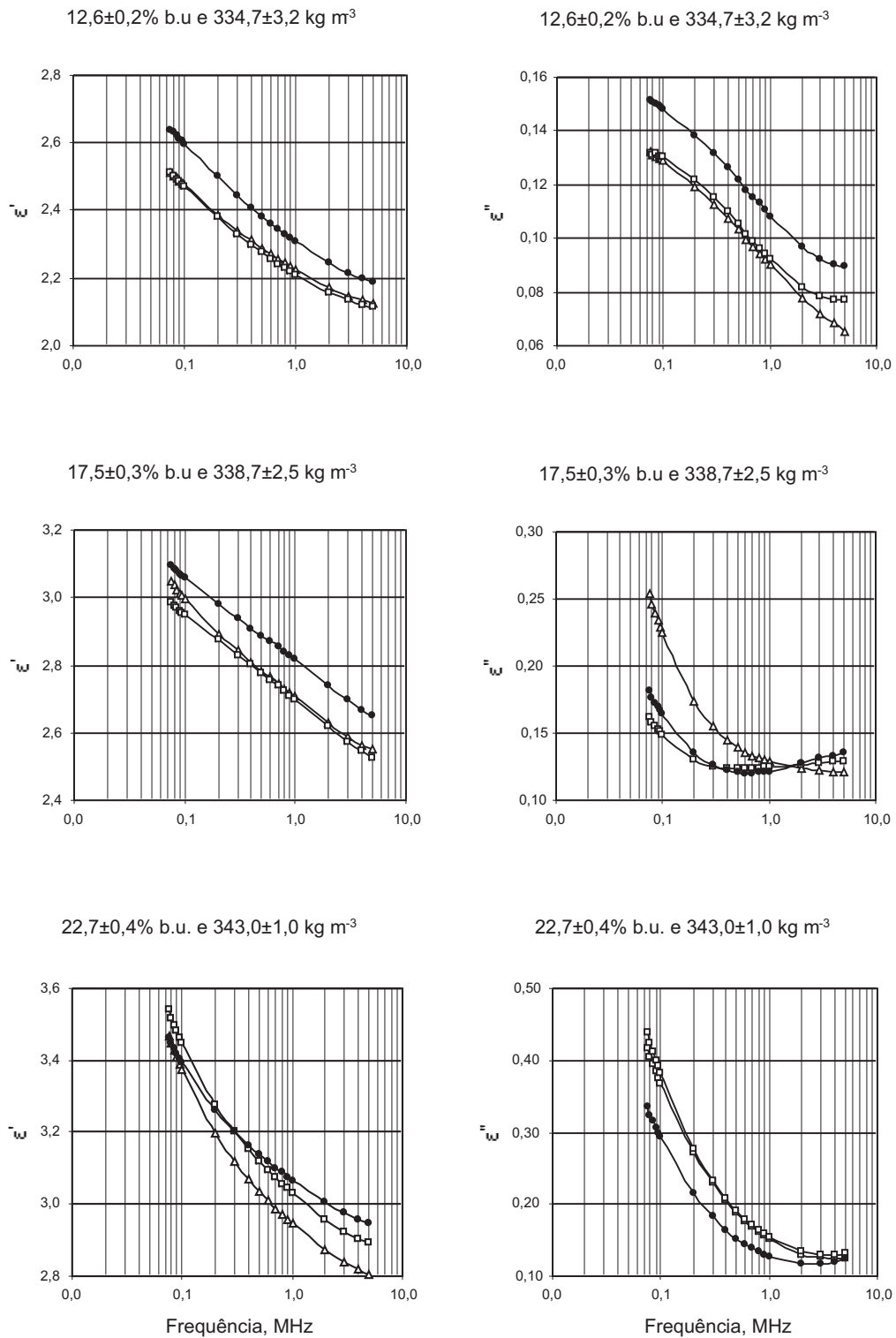


FIGURA 1. Variação de ϵ' e ϵ'' de sementes não compactadas de três variedades de café em função da frequência, para valores indicados de teor de água e massa específica aparente, a 21 °C. ●, Mundo Novo; □, Catuaí Vermelho; △, Catuaí Amarelo

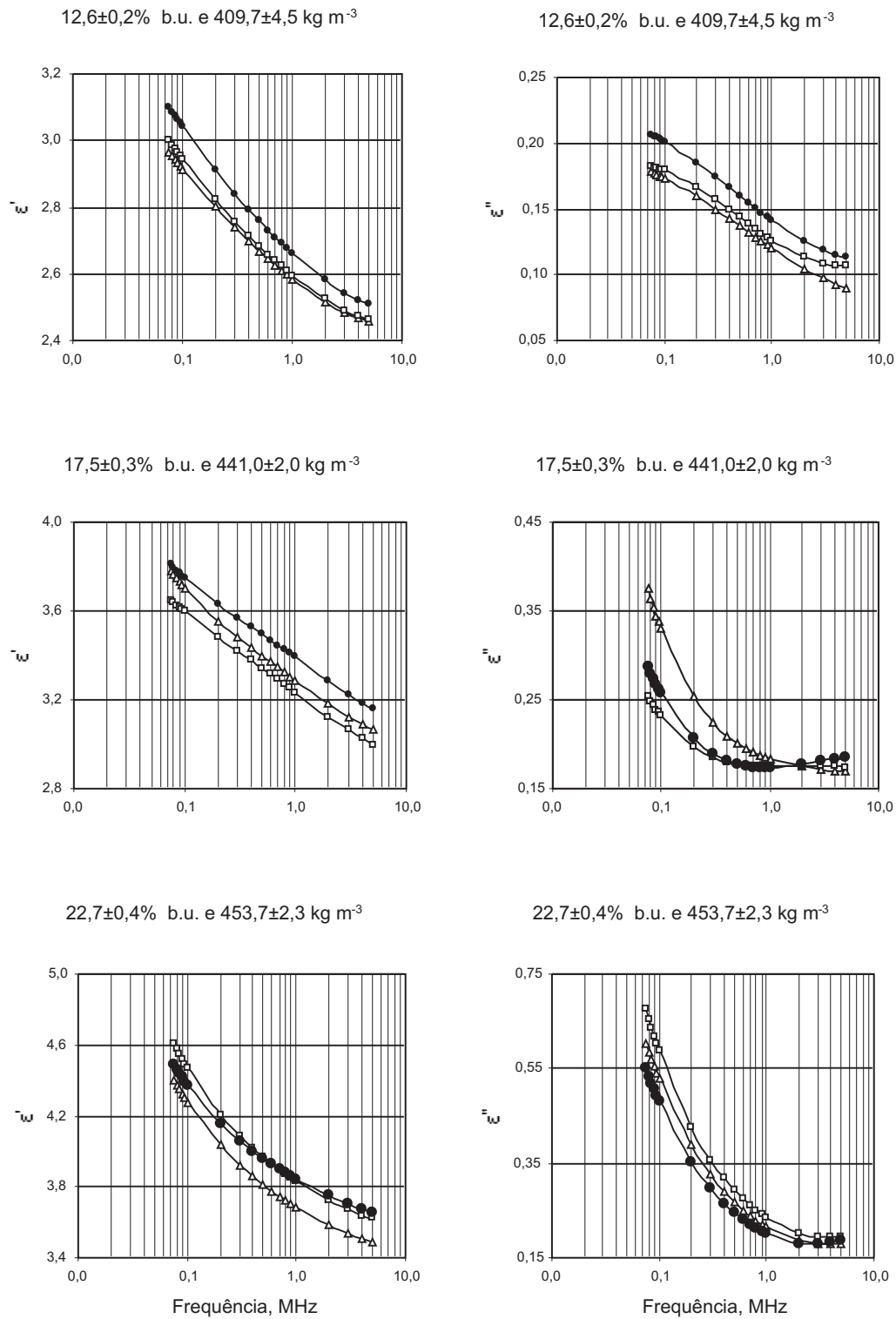


FIGURA 2. Variação de ϵ' e ϵ'' de sementes compactadas de três variedades de café em função da frequência, para valores indicados de teor de água e massa específica aparente, a 21 °C. ●, Mundo Novo; □, Catuaí Vermelho; △, Catuaí Amarelo.

todo intervalo de frequência e para os dois níveis de compactação, do que os valores obtidos para as demais variedades. Entretanto, para sementes mais úmidas (22,7% b.u.), observa-se uma mudança nessa tendência, com a curva representativa da variação de ϵ' passando a ocupar posição intermediária em relação àquelas das variedades Catuaí Amarelo e Vermelho, para frequências entre 300 e 700 kHz. Quanto ao fator de perda dielétrica, os valores obtidos para as sementes da variedade Mundo Novo são maiores que os das outras duas variedades apenas para sementes mais secas (12,6% b.u.). O efeito da variedade na alteração do comportamento da curva representativa da variação de ϵ'' foi observado no estágio intermediário de umidade e para valores mais elevados de frequência, entre 1 e 2 MHz, quando comparado com o efeito provocado na curva de ϵ' .

A permissividade elétrica relativa para sementes com teor de água de $12,0 \pm 0,4\%$ b.u., a 5 MHz e 21 °C, variou de 2,08 a 2,46 e o fator de perda dielétrica de 0,0670 a 0,1071. Os menores valores de ϵ' e ϵ'' , nas condições especificadas, foram observados para sementes da variedade Catuaí Amarelo com massa específica de 326 kg m^{-3} ; os maiores valores foram obtidos empregando-se sementes da variedade Catuaí Vermelho com $\rho = 443 \text{ kg m}^{-3}$. Essas diferenças correspondem a variações de 18% no valor de ϵ' e de 60% no de ϵ'' . Berbert (1995) estudou o efeito da variedade nas propriedades dielétricas de sementes de trigo a 500 kHz e 24°C e observou variações de 6% e 29% nos valores de ϵ' e ϵ'' , respectivamente. Variações de 12% (para ϵ') e de 22% (para ϵ'') foram constatadas por Nelson (1965) ao medir as propriedades dielétricas de sementes de 16 variedades de trigo com teor de água de 12,5% b.u., a 40 MHz e 24°C.

Ainda não há explicações conclusivas para a ocorrência de variações expressivas nos valores das propriedades dielétricas de sementes em função apenas da variedade. Observa-se que, em geral, sementes de pequenas dimensões (trigo e sorgo), apresentam menores variações nos valores de ϵ' e ϵ'' em função da variedade do que sementes relativamente maiores (feijão e café), para um mesmo espaçamento entre os eletrodos dos sensores capacitivos. No entanto, para sementes de uma mesma espécie, se não há diferença acentuada de tamanho para as diferentes variedades, o espaçamento entre os eletrodos não é uma variável que possa explicar as diferenças observadas (Nelson, 1982). Quanto ao efeito da composição química das sementes sobre suas propriedades dielétricas, os estudos continuam incipientes e limitados. Nelson e Stetson (1976) não observaram efeito significativo dos teores de proteína, óleo e cinzas sobre as

propriedades dielétricas de sementes de trigo de nove variedades diferentes.

As variações observadas nas propriedades dielétricas de sementes de café em função da variedade indicam que para a obtenção de modelos que permitam estimar seu teor de água a partir de valores medidos de ϵ' e ϵ'' , e que seja independente da massa específica aparente das amostras, será necessário abordar a questão em duas etapas. Numa primeira fase, será preciso desenvolver uma equação de calibração por métodos de regressão empregando-se simultaneamente os valores das propriedades dielétricas obtidos para duas das variedades estudadas e, posteriormente, avaliar o grau de acurácia do modelo utilizando-se valores de ϵ' e ϵ'' obtidos apenas para a terceira variedade. Sendo assim, serão empregados os valores das propriedades dielétricas das variedades Mundo Novo e Catuaí Amarelo para o desenvolvimento das equações de calibração e seus desempenhos na estimativa do teor de água serão avaliados empregando-se os dados obtidos com as sementes da variedade de verificação, ou seja, Catuaí Vermelho.

Redução do efeito de ρ na determinação do teor de água de sementes de café por meio da medição simultânea de ϵ' em duas frequências de oscilação

O método da regressão múltipla proposto por McFarlane (1987) foi utilizado para estabelecer relações funcionais do tipo $U = F(\epsilon', \rho)$ e $\rho = F(\epsilon', U)$, em que r representa a massa específica aparente (kg m^{-3}) e U o teor de água das sementes de café das variedades de calibração, para sete valores de frequência no intervalo entre 80 kHz e 5 MHz e teores de água entre 11,0 e 23,1% b.u. (Tabela 1). Como já havia sido observado para sementes de trigo por Berbert e Stenning (1999), as análises de regressão revelaram que a permissividade elétrica relativa de sementes de café também é função linear do teor de água e da massa específica aparente das amostras. Na frequência de 5 MHz, obteve-se a equação apresentada a seguir, com $r^2 = 0,9647$, cujo resultado revela que apenas 3% da variação de ϵ' não podem ser explicados pelas variações no teor de água e massa específica aparente das amostras de café.

$$\epsilon'_{(5\text{MHz})} = 0,0821U + 0,0051r - 0,6710 \quad (1)$$

Os resultados apresentados na Tabela 1 também revelam que o coeficiente de determinação (ρ^2) para as funções do tipo $\rho = F(\epsilon', U)$ é ligeiramente maior para o maior valor de frequência; além disso, na derivação de equações a partir do modelo proposto por McFarlane (1987) deve-se considerar que, para dada alteração no valor do teor de água, as correspondentes alterações no valor de ϵ' são maiores no intervalo de baixas frequências. Se o método proposto por

TABELA 1. Equações que relacionam a permissividade elétrica relativa ϵ' , o teor de água, 11,0% b.u. $\leq U \leq$ 23,1% b.u. e a massa específica aparente, ρ (kg m^{-3}), de sementes de café das variedades Mundo Novo e Catuaí Amarelo, para diversos valores de frequência, a 21°C e 63% de umidade relativa.

Frequência (MHz)	Equações	r^2	Erro padrão da estimativa	Intervalo de variação dos resíduos
0,080	$U = 8,6504 \rho - 0,0613 \rho + 12,6318$	0,9277	1,0	-2,6 a 2,2
	$= 116,7353 \rho - 12,1886U + 216,3608$	0,8522	14,4	-41,8 a 37,1
0,090	$U = 8,8241 \rho - 0,0616 \rho + 12,4173$	0,9256	1,0	-2,6 a 2,2
	$= 118,0926 \rho - 12,0522U + 212,5499$	0,8505	14,5	-42,0 a 37,5
0,100	$U = 8,9723 \rho - 0,0618 \rho + 12,2277$	0,9236	1,1	-2,7 a 2,3
	$= 119,2551 \rho - 11,9365U + 209,4253$	0,8485	14,6	-42,1 a 37,8
0,300	$U = 9,9958 \rho - 0,0614 \rho + 10,5943$	0,9083	1,2	-2,6 a 2,7
	$= 129,4228 \rho - 11,3672U + 191,0836$	0,8253	15,7	-41,6 a 37,3
0,500	$U = 10,2823 \rho - 0,0603 \rho + 10,0528$	0,9086	1,2	-2,6 a 2,8
	$= 134,6114 \rho - 11,4939U + 187,0247$	0,8211	15,9	-40,2 a 35,2
1,000	$U = 10,6157 \rho - 0,0600 \rho + 9,4642$	0,9172	1,1	-2,2 a 2,8
	$= 143,5157 \rho - 12,0130U + 182,0048$	0,8267	15,6	-37,6 a 31,2
5,000	$U = 11,4707 \rho - 0,0574 \rho + 8,2349$	0,9443	0,9	-1,8 a 2,4
	$= 168,4476 \rho - 13,5678U + 163,6430$	0,8648	13,8	-32,5 a 28,8

McFarlane (1987) fosse integralmente aplicado no presente trabalho, deveriam ser escolhidas as funções $r = F(\epsilon', U)$ a 5 MHz e $U = F(\epsilon', r)$ para frequências entre 0,080 a 1 MHz, para integrar os modelos de determinação do teor de água de sementes de café a partir da medição simultânea de ϵ' , em duas frequências de oscilação do campo. Conseqüentemente, por substituição de variáveis, seriam obtidos seis modelos dielétricos ao incorporar a função $r = F(\epsilon'_{5\text{MHz}}, U)$, ou seja, $\rho = 168,4476 \epsilon'_{(5\text{MHz})} - 13,5678 U + 163,6430$, nas funções $U = F(\epsilon'_{80\text{kHz}}, \rho)$ a $U = F(\epsilon'_{1\text{MHz}}, \rho)$.

No entanto, em função do nível dos erros obtidos anteriormente em função da adoção desse procedimento (Berbert e Stenning, 1999; Berbert et al., 2004) 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 no intervalo de frequências mencionado anteriormente. Os resultados são mostrados na Tabela 2, onde se observa que o desempenho das diversas equações é muito semelhante na predição do teor de água de sementes de café, a partir da medição simultânea da permissividade elétrica relativa em duas frequências, porém,

os valores dos coeficientes de determinação e dos erros padrão da estimativa, bem como a magnitude dos intervalos de variação dos resíduos demonstram que o método utilizado não resulta em um modelo adequado para o cálculo do teor de água que seja independente da massa específica da amostra. Para as frequências de 500 kHz e 5,0 MHz (equação 2, $r^2 = 0,7977$), o erro padrão da estimativa e o resíduo máximo foram de 1,7 e 4,2 pontos percentuais, respectivamente. 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 café com o grau de exatidão exigido em práticas de instrumentação agrícola.

$$U = 28,4576 \epsilon'_{(5\text{MHz})} - 18,2487 \epsilon'_{(500\text{kHz})} - 6,2953 \quad (2)$$

No entanto, para efeitos comparativos, utilizou-se a equação (2) para estimar o teor de água de amostras de café das variedades Catuaí Amarelo e Mundo Novo e os resultados são mostrados na Figura 3A, onde se vê o gráfico de correspondência entre valores experimentais e estimados de teor de água. Nesta figura, a linha contínua representa a correspondência ideal entre estes dois valores. O erro padrão de calibração (EPC) foi de 1,7 pontos percentuais. O erro ou

TABELA 2. Equações obtidas por regressão linear que relacionam o teor de água de sementes de café das variedades Mundo Novo e Catuaí Amarelo, 11,0% b.u. ≤ U ≤ 23,1% b.u., e a permissividade elétrica relativa ε' medida simultaneamente em duas frequências de oscilação do campo, a 21 °C e 63% de umidade relativa.

Frequências (MHz)	Equação	r ²	Erro padrão da estimativa	Intervalo de variação dos resíduos
0,080 e 5,0	U = 13,9060 ' _{5MHz} - 4,3237 ' _{0,080MHz} - 6,7502	0,7555	1,9	-3,1 a 5,1
0,090 e 5,0	U = 15,4389 ' _{5MHz} - 5,5759 ' _{0,090MHz} - 6,9593	0,7593	1,9	-3,2 a 5,1
0,100 e 5,0	U = 16,7751 ' _{5MHz} - 6,7021 ' _{0,1MHz} - 7,0817	0,7631	1,9	-3,2 a 5,0
0,300 e 5,0	U = 25,4643 ' _{5MHz} - 15,0685 ' _{0,3MHz} - 6,5252	0,7939	1,7	-3,7 a 4,4
0,500 e 5,0	U = 28,4576 ' _{5MHz} - 18,2487 ' _{0,5MHz} - 6,2953	0,7977	1,7	-3,7 a 4,2
1,000 e 5,0	U = 35,1965 ' _{5MHz} - 25,1347 ' _{1MHz} - 6,3915	0,7956	1,7	-3,6 a 4,1

desvio padrão de calibração 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 e é calculado da seguinte maneira:

$$EPC = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-p-1} \right)} \quad (3)$$

em que e_i representa a diferença entre os teores de água obtidos em estufa e aqueles 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 e Kraft, 1989; Lawrence e Nelson, 1993).

A seguir, utilizou-se a equação de calibração (2) para calcular o teor de água de amostras de sementes de café da variedade Catuaí Vermelho e os resultados são apresentados na Figura 3B, onde se vê o gráfico de correspondência entre valores experimentais e estimados de teor de água. O erro padrão de predição (EPP) e o erro máximo foram de 1,8 e 4,0 pontos percentuais, respectivamente. O erro padrão de predição representa o desvio padrão das diferenças entre os valores de teor de água determinados em estufa e aqueles estimados pela equação de calibração, utilizando-se os dados da variedade de verificação (Catuaí Vermelho), e é calculado utilizando-se a seguinte equação, em que \bar{e} representa o valor médio destas diferenças.

$$EPP = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1} \right)} \quad (4)$$

A utilização da massa específica como variável

dependente, resultou na equação apresentada a seguir, com coeficiente de determinação igual a 0,9521. Este resultado mostra que a massa específica tem influência significativa ao se tentar estimar o teor de água de amostras de sementes de café por meio da medição simultânea da permissividade elétrica relativa, em duas frequências. Os erros padrão da estimativa e de predição entre os valores medidos e estimados do teor de água, utilizando-se a equação (5), foi de 0,8 ponto percentual, sendo que as diferenças máximas chegaram a 2,2 (calibração) e 1,7 (predição) pontos percentuais, respectivamente. Apresentam-se, nas Figuras 4A e 4B, os gráficos de correspondência entre os valores experimentais do teor de água de sementes de café e aqueles estimados pela equação (5), para as variedades de calibração e de verificação, respectivamente.

$$U = 19,7268 \epsilon'_{5\text{MHz}} - 7,6129 \epsilon'_{0,5\text{MHz}} - 0,0536 \rho + 6,9113 \quad (5)$$

Redução do efeito de ρ na determinação do teor de água de sementes de café por meio da medição simultânea de ϵ' e ϵ'' em duas frequências de oscilação

A partir do método proposto por Lawrence e Nelson (1993), Berbert e Stenning (1999) observaram que o valor de $\ln(\epsilon'')$ é um bom indicador da quantidade de água presente em sementes de trigo, em frequências de 0,5 e 5,0 MHz. As retas de mínimos quadrados que se ajustaram ao conjunto de valores tiveram coeficientes de determinação de 0,94 e 0,96, respectivamente. Para sementes de café, constatou-se que o valor de $\ln(\epsilon'')$ não é tão bom indicador do teor de água quanto o foi para o trigo. As equações obtidas por regressão linear, e que correlacionavam a massa de água presente nas amostras de café e o $\ln(\epsilon'')$, tiveram coeficientes de determinação de 0,7645 e de 0,6869 para as frequências de 0,5 e 5,0 MHz;

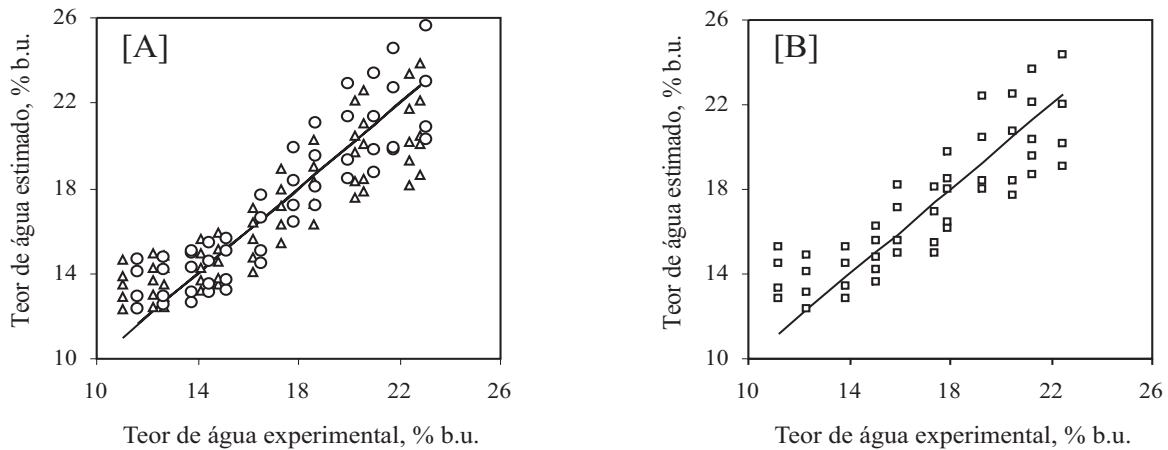


FIGURA 3. Correspondência entre os valores de teores de água determinados pelo método padrão de estufa e aqueles estimados pela equação (2). [A] Para amostras de sementes de café das variedades de calibração Catuaí Amarelo (Δ) e Mundo Novo (\circ) e [B] Para amostras da variedade de verificação Catuaí Vermelho (\square).

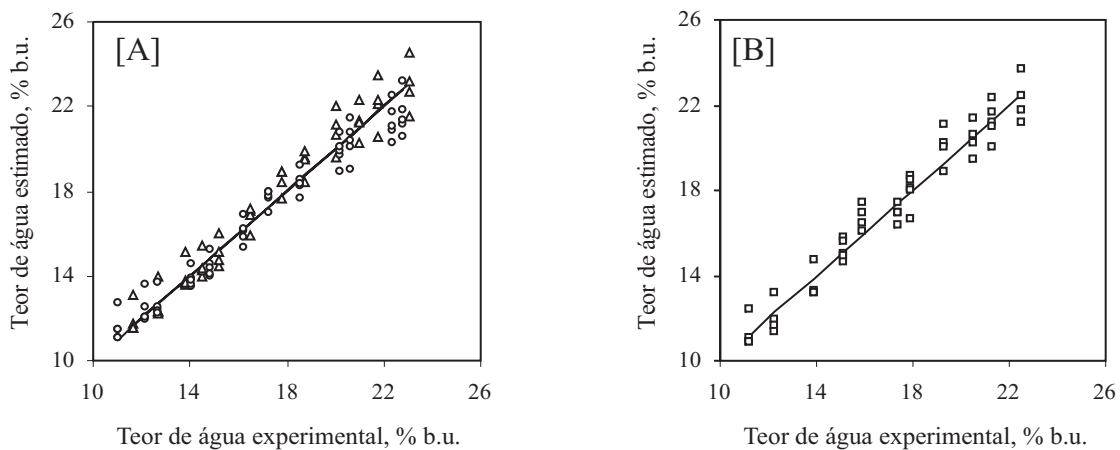


FIGURA 4. Correspondência entre os valores de teores de água determinados pelo método padrão de estufa e aqueles estimados pela equação (5). [A] Para amostras de sementes de café das variedades de calibração Catuaí Amarelo (Δ) e Mundo Novo (\circ) e [B] Para amostras da variedade de verificação Catuaí Vermelho (\square).

apesar disso, para efeitos comparativos obteve-se a seguinte equação de calibração para o cálculo do teor de água no intervalo 11,0% b.u. $\leq U \leq 23,1\%$ b.u., utilizando-se duas propriedades dielétricas, ϵ' e ϵ'' , de amostras das variedades Mundo Novo e Catuaí Amarelo, para duas frequências de oscilação do campo elétrico, 0,5 e 5,0 MHz.

$$U = - 65,7554 \epsilon'_{0,5\text{MHz}} + 68,1581 \epsilon'_{5\text{MHz}} + 6,5006 \ln(\epsilon'')_{0,5\text{MHz}} + 12,5546 \ln(\epsilon'')_{5\text{MHz}} + 65,2819 \quad (6)$$

A equação (6) tem coeficiente de determinação igual a 0,8929 e os erros padrão de calibração e predição foram de 1,3 e 1,2 pontos percentuais, resultados que demonstram que o desempenho da equação de calibração se tornou superior

quando se incluiu o valor de $\ln(\epsilon'')$ na análise de regressão. O desempenho da equação (6) no cálculo do teor de água de amostras de sementes de café das variedades de calibração, Mundo Novo e Catuaí Amarelo, e da variedade de verificação, Catuaí Vermelho, é mostrado graficamente nas Figuras 5A e 5B, respectivamente.

Redução do efeito de ρ na determinação do teor de água de sementes de café, por meio da medição simultânea de ϵ' e ϵ'' em uma única frequência de oscilação

O método das regressões múltiplas proposto por Kraszewski e Kulinski (1976) foi utilizado para estabelecer uma relação funcional do tipo $\epsilon'_{5\text{MHz}} = F(M_A, M_{MS})$, em que

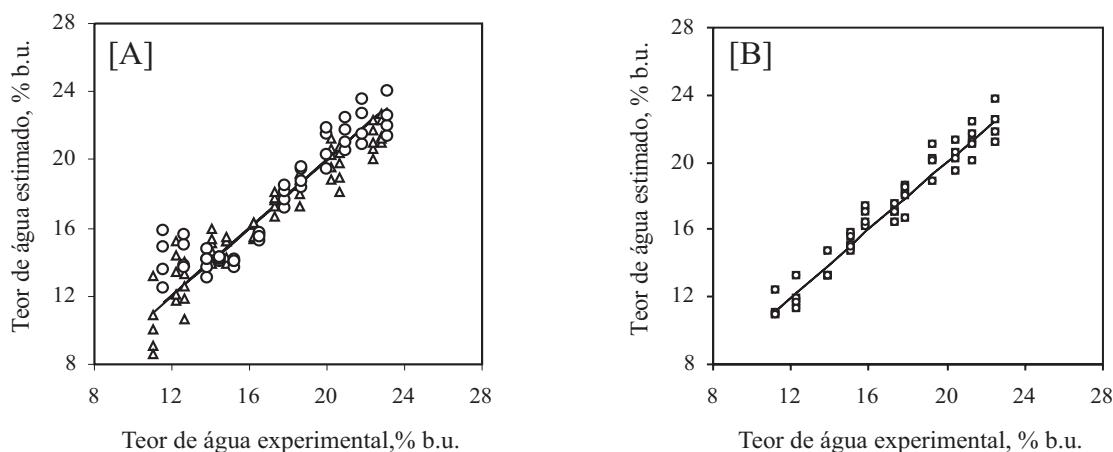


FIGURA 5. Correspondência entre os valores de teores de água determinados pelo método padrão de estufa e aqueles estimados pela equação (6). [A] Para amostras de sementes de café das variedades de calibração Catuai Amarelo (Δ) e Mundo Novo (\circ) e [B] Para amostras da variedade de verificação Catuai Vermelho (\square).

M_A e M_{MS} representam a massa de água e de matéria seca contidas em sementes de café das três variedades, em gramas, e que ocupam o volume útil do sensor, que é de $5,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Os valores de ϵ' obtidos experimentalmente ajustaram-se à seguinte equação de regressão, com coeficiente de determinação igual a 0,9712.

$$\epsilon'_{5\text{MHz}} = 0,0025 M_A + 0,4123 M_{MS} + 0,7727 \quad (7)$$

Devido à linearidade entre $\ln(\epsilon'')$ e a massa de água no trigo a 1,0 MHz, Lawrence e Nelson (1993) revelaram que 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. De fato, no método visto anteriormente, a inclusão de $\ln(\epsilon'')$ melhorou o desempenho da equação de predição do teor de água de sementes de café, mas os resultados obtidos com o presente método a 5 MHz revelaram que o valor de $\ln(\epsilon'')$ não é melhor indicador da quantidade de água presente nas sementes de café que o valor inalterado de ϵ'' . Os métodos de regressão múltipla utilizados para correlacionar os valores de ϵ'' e $\ln(\epsilon'')$ aos valores de M_A e M_{MS} de sementes de café das três variedades, permitiram a obtenção das seguintes equações, com coeficientes de determinação iguais a 0,7567 e 0,6968, respectivamente.

$$\epsilon''_{5\text{MHz}} = 0,0033 M_A + 0,0003 M_{MS} - 0,0479 \quad (8)$$

$$\ln(\epsilon'')_{5\text{MHz}} = 0,0278 M_A + 0,0018 M_{MS} - 3,4087 \quad (9)$$

O método de Kraszewski e Kulinski (1976) que preconiza a obtenção de funções do tipo $M_A = F(\epsilon', \epsilon'')$ e $M_{MS} = F(\epsilon', \epsilon'')$ por meio de separação de variáveis, não resultou, para as condições deste trabalho, em equações que produzissem

valores consistentes de M_A e M_{MS} . Sendo assim, ao invés da resolução das expressões analíticas (7) e (8) pelo método da separação de variáveis, utilizou-se o método dos mínimos quadrados para correlacioná-las diretamente. Realizando-se análises de regressão para correlacionar os valores de M_A e M_T aos valores de ϵ' e ϵ'' , a 5 MHz, obtiveram-se as seguintes equações de calibração, com coeficientes de determinação iguais a 0,9720 e 0,3934, respectivamente.

$$M_A = 29,5704 \epsilon'_{5\text{MHz}} - 76,3134 \epsilon''_{5\text{MHz}} - 33,8777 \quad (10)$$

$$M_T = 23,1686 \epsilon'_{5\text{MHz}} + 104,4965 \epsilon''_{5\text{MHz}} + 139,1727 \quad (11)$$

Verifica-se, portanto, que a variação nos valores da massa total das amostras de sementes de café, M_T , não pode ser explicada pelas variações nos valores da permissividade elétrica relativa nem do fator de perda dielétrica a 5 MHz. Berbert et al. (2004) observaram o mesmo comportamento na determinação do teor de água de sementes de feijão. No entanto, Berbert et al. (1999) estudando o método proposto por Kraszewski e Kulinski (1976) para a redução da influência da massa específica aparente na determinação do teor de água de sementes de trigo, obtiveram uma função do tipo $M_{MS} = F[\epsilon', \ln(\epsilon'')]$, com coeficiente de determinação igual a 0,96. No presente trabalho também não foi possível estabelecer-se uma relação funcional entre M_{MS} e $\ln(\epsilon'')$.

Substituindo-se as equações (10) e (11) na relação que define o teor de água, em porcentagem base úmida, ou seja, $U = [M_A/M_T]100$, obtém-se a seguinte equação para o cálculo do teor de água de sementes de café, independentemente da massa específica aparente da amostra.

$$U = \left(\frac{29,5704\epsilon'_{5\text{MHz}} - 76,3134\epsilon''_{5\text{MHz}} - 33,8777}{23,1686\epsilon'_{5\text{MHz}} + 104,4965\epsilon''_{5\text{MHz}} + 139,1727} \right) 100 \quad (12)$$

Utilizou-se, então, a equação (12) para se estimar o teor de água de amostras de sementes de café das variedades Catuaí Amarelo e Mundo Novo e o erro padrão de calibração foi de 1,7 pontos percentuais e os resíduos variaram entre -2,3 e 4,6. Além de o valor do EPC estar fora de limites aceitáveis para fins de instrumentação e calibração, a magnitude do intervalo de variação dos resíduos também evidencia que o método proposto não propicia a obtenção de uma equação para o cálculo do teor de água de sementes de café que seja verdadeiramente independente de sua massa específica aparente. Observa-se, também, uma piora sensível nos resultados quando o desempenho da equação (12) é comparado com aquele da equação (6).

A variação irregular do fator de perda dielétrica em função da frequência (Figuras 1 e 2) é uma das prováveis razões para que a inclusão do $\ln(\epsilon'')$ ou do valor inalterado de ϵ'' não tenha melhorado, com o nível esperado, o desempenho dos modelos dielétricos para estimativa do teor de água de sementes de café. Para determinados valores de frequência e massa específica aparente, amostras com menor teor de água apresentaram valores maiores de ϵ'' que amostras mais úmidas. Este fato contraria a expectativa da ocorrência de maior dissipação de calor, em função da oscilação das moléculas polares de água em campos elétricos alternados, associada a sementes com teores elevados de água. O comportamento irregular do fator de perda dielétrica para as condições estudadas, indica que o intervalo de radiofrequências em que foram feitas as medições, pode não ser o mais indicado para a utilização de sensores capacitivos em medidores em linha do teor de água de sementes de café.

CONCLUSÕES

O método proposto por McFarlane (1987) não permite a obtenção de um modelo para a determinação do teor de água de sementes de café, que seja independente da massa específica aparente das amostras, para o intervalo de radiofrequências estudado.

A inclusão do valor de $\ln(\epsilon'')$ como covariável, conforme preconizado no método desenvolvido por Lawrence e Nelson (1993), contribui para melhorar o desempenho do modelo dielétrico para estimativa do teor de água de sementes de café.

O método proposto por Kraszewski e Kulinski para frequências de microondas também não permite a obtenção

de um modelo para a determinação do teor de água de sementes de café totalmente independente da massa específica aparente das amostras.

REFERÊNCIAS

- BERBERT, P.A. **On-line density-independent moisture content measurement of hard winter wheat using the capacitance method**. 1995. 227 f. Thesis (Ph.D in Agricultural Engineering). Postharvest Technology Department, Cranfield University, Silsoe, 1995.
- BERBERT, P.A.; STENNING, B.C. Influência do teor de água nas propriedades dielétricas de sementes de trigo - *Triticum aestivum* L. no intervalo de 500 kHz a 5 MHz. **Engenharia Agrícola**, v.16, n.4, p.47-58, 1997.
- 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.
- BERBERT, P.A.; SOUSA, E.F.; FARONI, L.R.D.; MELO, E.C.; QUEIROZ, D.M.; STENNING, B.C. Utilização de propriedades dielétricas na determinação do teor de umidade do trigo. **Engenharia Agrícola**, v.19, n.2, p.238-247, 1999.
- BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SOUSA, E.F.; MOLINA, M.B.; MELO, E.C.; FARONI, L.R.D. Dielectric properties of parchment coffee. **Biosystems Engineering**, v.80, n.1, p.65-80, 2001.
- BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; MELO, E.C. Dielectric properties of common bean. **Biosystems Engineering**, v.83, n.4, p.449-462, 2002.
- BERBERT, P.A.; VIANA, A.P.; DIONELLO, R.G.; CARLESSO, V.O. Three dielectric models for estimating common bean moisture content. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 14, 2004, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: 2004. v.B, p. 1502-1509.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília. SNDA/DNDV/CLAV, 1992. 365p.
- JARRET, J.; KRAFT, A. **Statistical analysis for decision making**. Boston: Allyn and Bacon, 1989. 712p.
- KAATZE, U. Microwave dielectric properties of water. In: KRASZEWSKI, A. (Ed.). **Microwave Aquametry**. New York: IEEE Press, 1996. p.37-53.
- KRASZEWSKI, A.; KULINSKI, S. An improved microwave method of moisture content measurement and control. **IEEE Transactions on Industrial electronics and control instrumentation**, IECI, v.23, n.4, p.364-370, 1976.
- KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. **Electromagnetics**. 2nd Ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1973. 828p.
- KRESS-ROGERS, E.; KENT, M. Microwave measurement of powder moisture and density. **Journal of Food Engineering**, v.6, p.345-376, 1987.
- LAWRENCE, K. C.; NELSON, S. O. Radio-frequency density-independent moisture determination in wheat. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.36, n.2, p.477-

483, 1993.

LAWRENCE, K.C.; WINDHAM, W.R.; NELSON, S.O. Sensing moisture content independent of density. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.4, n.3, p.693-699, 1998.

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**, v.13, p.1823-30, 1980.

NELSON, S. O. Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50-MC range. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.8, n.1, p.38-43, 1965.

NELSON, S. O.; STETSON, L. E. Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of hard red winter wheat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.21, p.181-192, 1976.

NELSON, S. O. Factors affecting the dielectric properties of grain. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.25, n.2, p.1045-1049, 1056, 1982.

NELSON, S.O. Dielectric properties measurement techniques and applications. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, 1998. 13p. (ASAE Paper 983067).

POWELL, S.D.; MCLENDON, B.D.; NELSON, S.O.; KRASZEWSKI, A.W.; ALLISON, J.M. Use of a density independent function and microwave measurement system for grain moisture measurement. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.31, n.6, p.1875-81, 1988.

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

TRABELSI, S.; KRASZEWSKI, A.W.; NELSON, S.O. Optimizing a universal calibration for industrial microwave moisture sensors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMAGNETIC WAVE INTERACTION WITH WATER AND MOIST SUBSTANCES, 4, 2001, Weimar. **Proceedings...** Weimar: MFPA an der Bauhaus-Universität, 2001. p.117-124.

ZHANG, Y.; OKAMURA, S. New function of dielectric properties for density-independent moisture measurement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMAGNETIC WAVE INTERACTION WITH WATER AND MOIST SUBSTANCES, 4, 2001, Weimar. **Proceedings...** Weimar: MFPA an der Bauhaus-Universität, 2001. p.111-116.

