



Avaliação de três modelos dielétricos derivados da função $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ na estimativa do teor de água de sementes de feijão¹



Pedro A. Berbert², Daniel M. de Queiroz³, Elias F. de Sousa², Alexandre P. Viana²,
Edenio Detmann² & Vinícius de O. Carlesso²

¹ Trabalho realizado com apoio financeiro da IFS, CNPq, FAPEMIG, FINEP/RECOPE e FAPERJ

² LEAG/UENF, Av. Alberto Lamego 2000, Pq. Califórnia, CEP 28013-602, Campos dos Goytacazes, RJ. E-mail: pberbert@uenf.br (Foto)

³ DEA/UFV, CEP 36571-000, Viçosa, MG. E-mail: queiroz@ufv.br

Protocolo 26 - 14/2/2003 - Aprovado em 30/1/2004

Resumo: Sensores capacitivos operando em radiofrequências são considerados ferramentas mais adequadas para a estimativa *on-line* do teor de água de grãos por meio de sua utilização na medição da permissividade elétrica relativa (ϵ') e do fator de perda dielétrica (ϵ'') desses produtos. No entanto, devido à impossibilidade de controlar o fluxo de massa de grãos em movimento, há que se buscar soluções para a redução da influência da massa específica aparente (ρ) nos resultados obtidos com esse tipo de sensor, em que a melhor alternativa tem sido a utilização de modelos dielétricos que correlacionem ϵ' e ϵ'' ao teor de água e que sejam independentes de ρ . Sendo assim, o objetivo desse trabalho consistiu na avaliação do grau de acurácia dos resultados, calculados a partir de três funções derivadas da função $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ na determinação *on-line* do teor de água de sementes de feijão em movimento. O melhor desempenho foi obtido com o modelo que utiliza duas frequências e foi derivado a partir da combinação da função $[(\epsilon'-1)/\epsilon''] / [(2\sqrt{\epsilon'}) / (1 + \sqrt{\epsilon'})]$ com o $\ln(\epsilon'')$, permitindo estimar-se o teor de água do feijão com erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,5 e 1,0 ponto percentual, respectivamente.

Palavras-chave: instrumentação, modelos dielétricos, teor de água, *Phaseolus vulgaris* L.

Evaluation of three dielectric models derived from the function $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ for estimating the moisture content of common bean seeds

Abstract: Capacitive sensors operating at radiofrequencies are considered one of the best tools for estimating grain moisture content on-line through the measurement of the relative permittivity ϵ' and dielectric loss factor - ϵ'' . However, due to the impossibility of controlling moving grain mass flow rate, one has to search solutions for the bulk density effect on the results obtained with this kind of sensor. The best alternative has been the use of density-independent dielectric models capable of correlating grain moisture content and the dielectric parameters ϵ' and ϵ'' . The object of this research work was to assess the degree of accuracy of calculated moisture content values using three dielectric models derived from the function $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$. The model capable of estimating moisture content of common bean with the highest degree of accuracy, uses two frequencies and was derived by combining the function $[(\epsilon'-1)/\epsilon''] / [(2\sqrt{\epsilon'}) / (1 + \sqrt{\epsilon'})]$ and $\ln(\epsilon'')$, producing results with a standard error of estimate and maximum error of 0.5 and 1.0 percentage point moisture, on wet basis, respectively.

Key words: instrumentation, dielectric models, moisture content, *Phaseolus vulgaris* L.

INTRODUÇÃO

A medição rápida, exata e precisa do teor de água de grãos e sementes é de grande importância nas operações de colheita, secagem, armazenamento, comercialização e processamento de produtos agrícolas. No entanto, a determinação do teor de água utilizando-se métodos-padrão, como os da estufa com convecção gravitacional ou forçada é muito lenta podendo, em alguns casos, se estender por até 72 h. Esse tipo de medição está se

tornando satisfatório apenas para um número limitado de operações de rotina em unidades de manuseio de grãos. Em unidades armazenadoras de grande porte, devido ao considerável volume de grãos manipulados, é essencial a utilização de métodos indiretos, rápidos e não destrutivos para estimar seu teor de água; alguns desses métodos, como aqueles em que se empregam sensores capacitivos e correlacionam o teor de água às propriedades elétricas do material, têm sido usados satisfatoriamente há vários anos e são calibrados em função de métodos-padrão (Kraszewski & Nelson, 1991).

Entretanto, seja em unidades de secagem e armazenamento de grãos ou em indústrias de processamento de alimentos com alto nível de tecnicidade, mesmo a medição do teor de água empregando-se os métodos elétricos tradicionais, está-se tornando obsoleta em determinadas atividades. Por exemplo, nas operações de controle automático de processos verifica-se que a utilização de medições utilizando-se amostras estáticas vem sendo progressivamente substituída pela medição do teor de água do produto em movimento, sem a necessidade da retirada de amostras localizadas. De acordo com King (1995) os principais motivos para esse incremento na utilização de medidores *on-line* do teor de água, devem-se aos seguintes fatores: 1) à informação em tempo real sobre o valor do teor de água, que permite a adaptação de diversos sistemas de controle, como controle por realimentação, liga-desliga, proporcional (P), integral (I), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD), proporcional-integrativo-derivativo (PID), aos sistemas de secagem e em operações unitárias na indústria de alimentos; 2) à economia de energia, devido à redução no grau de supersecagem; 3) à eliminação de tarefas repetitivas e entediantes, como a retirada de amostras e a determinação do teor de água *off-line*, a intervalos curtos e regulares, permitindo a utilização da mão-de-obra em outras tarefas; 4) à obtenção de um produto final de melhor qualidade, e 5) à possibilidade de separação e classificação dos produtos, de acordo com o seu teor de água.

Na análise do desenvolvimento da instrumentação que utiliza esses sensores *on-line*, é possível se observar a tendência do emprego de frequências de oscilação cada vez maiores, com o passar dos anos. Inicialmente, os circuitos de corrente contínua foram sendo substituídos por aqueles que operavam com corrente alternada; logo a seguir, foram introduzidos os medidores que funcionam em radiofrequências e, atualmente, o maior interesse nos institutos de pesquisa e em universidades tem recaído sobre os circuitos que utilizam microondas. A razão para tal é que, em frequências muito elevadas, há diminuição sensível da condutividade iônica, o que, teoricamente, resultaria em medições mais acuradas (Kraszewski & Nelson, 1991). No entanto, no setor industrial, ao contrário do que se esperava, a tecnologia de medição baseada em frequências de microondas não foi amplamente adotada. A principal razão é o custo significativamente mais elevado dos componentes para circuitos de microondas que para os que operam em radiofrequências, tornando aquele tipo de medidor menos atrativo para o eventual usuário.

Apesar disso, diversos trabalhos têm demonstrado que é possível, com as devidas adaptações, se desenvolver um protótipo de medidor *on-line* do teor de água de grãos que opere em frequências de rádio. Durante o desenvolvimento e antes da construção de um protótipo para esse tipo de aplicação, é imprescindível a derivação de modelos dielétricos que correlacionem o teor de água dos diversos produtos às suas propriedades dielétricas, principalmente a permissividade elétrica relativa (ϵ') e o fator de perda dielétrica (ϵ''). Esta é a única alternativa, além da utilização da técnica de atenuação de raios- γ , atualmente conhecida para eliminar ou reduzir a influência da massa específica aparente (ρ) no valor calculado do teor de água, pré-requisito indispensável no desenvolvi-

mento de um medidor *on-line* do teor de água de produtos agrícolas (Trabelsi & Nelson, 1998). Berbert (1995) demonstrou que é possível se avaliar o teor de água de sementes de trigo em movimento, em frequências de rádio, com erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,3 e 0,8 ponto percentual b.u., respectivamente.

A pesquisa realizada por Meyer & Schilz (1980) visando à determinação do teor de água com redução da influência da massa específica ou do fluxo de massa nos resultados obtidos, é um marco no estudo da utilização de propriedades dielétricas para que se estime o teor de água *on-line* de produtos granulares. Trata-se do primeiro trabalho que apresenta o desenvolvimento de um modelo dielétrico baseado em princípios teóricos, matemáticos e físicos, e que resultou na derivação consistente e elegante da função $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ que pode ser utilizada para avaliação do teor de água sem a influência do fluxo de massa do produto ou de sua massa específica aparente. Antes do trabalho de Meyer & Schilz (1980) todos os modelos foram derivados empiricamente e, a partir dele, foram feitas apenas adaptações à função original para a obtenção de modelos que pudessem ser empregados para produtos específicos ou em situações determinadas. Entre as adaptações feitas à função de Meyer & Schilz (1980), citam-se os trabalhos de Kent & Meyer (1982), Powell et al. (1988), Lawrence & Nelson (1993), Trabelsi et al. (1998), Zhang & Okamura (2001) e Sovlukov (2001). O problema da adaptação para o intervalo de radiofrequências de métodos desenvolvidos originalmente para frequências de microondas, reside no fato das funções obtidas não serem unívocas para todos os produtos e para todo o intervalo de teor de água normalmente utilizado em operações de secagem. Isto faz com que seja necessário utilizar-se modelos diferentes para variados intervalos de teor de água. A univocidade das funções adaptadas depende do intervalo de massa específica aparente do produto (Kupfer, 1996).

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

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

A análise da Eq. 1 permite verificar-se que, para os valores possíveis de ϵ' , ou seja, $1 = \epsilon' < \infty$, o fator $(1+\sqrt{\epsilon'})/(2\sqrt{\epsilon'})$ varia no intervalo entre 1,0 e 0,5. Portanto, ao aumento no valor de ϵ' de 2,0 para 3,0, corresponde uma mudança no valor do fator de 0,85 para 0,79. Para determinados produtos só se consegue esse nível de variação no valor de ϵ' quando se duplica a massa específica aparente. Sendo assim, Kent & Meyer (1982) concluíram que a função ξ é aproximadamente igual à função inalterada de Meyer & Schilz (1980) e, portanto, também independe do valor de ρ .

Nelson (1984) verificou que tanto ϵ' quanto ϵ'' podem ser representados por funções lineares, tendo ρ como variável independente, para um amplo intervalo de massa específica

aparente. Demonstrou-se que $(\epsilon')^{1/3}$ e $\sqrt{(\epsilon'' + \kappa)}$, em que κ é uma constante de pequeno valor e que depende do material, também eram funções lineares da massa específica aparente. Observou-se que no plano complexo representado por $(\epsilon')^{1/3} = F(\sqrt{(\epsilon'' + \kappa)})$, o lugar geométrico de $(\epsilon')^{1/3}$, em função da massa específica aparente (ρ), também é representado por uma reta que passa pelo ponto de coordenadas (1,0) para massa específica igual a zero. Teoricamente, este é o ponto que representaria os parâmetros dielétricos relativos ao vácuo, ou seja, $\epsilon' = 1$ e $\epsilon'' = 0$ (Kraus & Carver, 1973). Powell et al. (1988) utilizando os resultados obtidos por Nelson (1984), derivaram uma nova função a 10,5 GHz, (Eq. 2) e que seria independente da massa específica aparente de determinado produto granular para intervalos mais amplos de ρ que aqueles observados para a função inalterada de Meyer & Schilz (1980).

$$\eta = \frac{\sqrt[3]{\epsilon'} - 1}{\sqrt{\epsilon''}} \quad (2)$$

Zhang & Okamura (2001) desenvolveram um modelo dielétrico no qual o teor de água de folhas de chá é correlacionado à razão entre os valores de mudança de fase que ocorrem quando ondas eletromagnéticas em duas frequências de microondas interagem simultaneamente com o material. De acordo com os autores, a mudança de fase é descrita pela seguinte equação:

$$\Delta\Phi \approx (\sqrt{\epsilon'} - 1) \cdot d \cdot 360 \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

em que $\Delta\Phi$ representa a mudança de fase de microonda, ϵ' é a permissividade elétrica relativa, d é a espessura da camada de material e λ representa o comprimento de uma onda de determinada frequência no vácuo. De acordo com a Eq. 3, a razão entre as mudanças de fase que ocorrem quando duas ondas de frequências f_1 e f_2 , sendo $f_2 > f_1$, interagem simultaneamente com o material, pode ser expressa pela equação abaixo:

$$\frac{\Delta\Phi_{f_2}}{\Delta\Phi_{f_1}} = \left(\frac{\sqrt{\epsilon'_{f_2}} - 1}{\sqrt{\epsilon'_{f_1}} - 1} \right) \left(\frac{\lambda_{f_1}}{\lambda_{f_2}} \right) \quad (4)$$

Considerando que a razão $(\lambda_{f_1}/\lambda_{f_2})$ é uma constante, Zhang & Okamura (2001) obtiveram uma nova função, denominada função Γ nesse trabalho, envolvendo parâmetros dielétricos e que, teoricamente, seria independente da massa específica aparente das amostras no intervalo $200 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho \leq 800 \text{ kg m}^{-3}$. Além disso, a função é unívoca para teores de umidade entre 8 e 33% b.u. Os autores não informaram os valores do erro padrão da estimativa nem do erro máximo.

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

Apesar dos resultados obtidos por Berbert (1995) com o modelo dielétrico adaptado a partir do método de Meyer & Schilz (1980) haverem sido excelentes, restava ainda avaliar-se as adaptações realizadas pelos pesquisadores mencionadas anteriormente, ao método originalmente proposto por Meyer & Schilz (1980). Sendo assim, este trabalho teve como objetivo expandir o estudo sobre a determinação indireta do teor de água de sementes de feijão, adaptando, para o intervalo de radiofrequências, as metodologias propostas por Kent & Meyer (1982), Powell et al. (1988) e Zhang & Okamura (2001) e que utilizavam originalmente frequências no intervalo das microondas.

MATERIAL E MÉTODOS

Este 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 feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade Campeão-3, colhidas com teor de água de 24,0% b.u.

O teor de água das sementes do lote original foi reduzido, de início, para 20,6% b.u., em um secador de leito fixo a 28 °C; posteriormente, os lotes foram subdivididos em amostras de 2 kg que, para manutenção de suas características originais, foram armazenados em sacos de polietileno numa câmara climática sob temperatura de 4 °C. Para se obter amostras com teores de água entre 20,6 e 11,5% b.u., com reduções progressivas de um ponto percentual de teor de água, as amostras foram secadas por diferentes períodos de tempo, a temperatura de 28 °C, em um secador experimental de camada delgada e, depois dos tratamentos de secagem, foram colocadas em recipientes de vidro herméticos e armazenadas a 4 °C, por no mínimo 15 dias. Durante o período de armazenamento as amostras eram revolvidas três vezes ao dia para permitir maior homogeneidade na distribuição de umidade entre os grãos. Todas as medições elétricas foram feitas num ambiente com temperatura do ar de 20 ± 1 °C e umidade relativa de 66 ± 2 %.

Adotou-se o seguinte procedimento para determinação do 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 se encontrava 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, os grãos fluíam e se alojavam no espaço disponível do elemento sensor. Para se obter os demais valores de massa específica aparente vertia-se, de início, a amostra em um funil de alumínio posicionado acima do capacitor; 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 os grãos

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 obter-se três valores de massa específica aparente. Para se reduzir o valor de ρ , misturavam-se as amostras de feijão com uma quantidade predeterminada de grânulos de poliestireno expandido com diâmetro de aproximadamente 6 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 & Skochdopole, 1964; Kraus & 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 se deu 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 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.

Os valores dos dois parâmetros que compõem a permissividade complexa relativa do feijão, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, foram obtidos indiretamente utilizando-se os valores medidos de capacitância e condutância do sensor capacitivo, com e sem a amostra entre os eletrodos. Em todas as medições elétricas feitas neste trabalho, utilizou-se o circuito paralelo equivalente do medidor. Este circuito interpreta o capacitor como parte integrante de uma combinação capacitor-resistor em paralelo. A metodologia empregada no cálculo dos valores da permissividade elétrica relativa do feijão ϵ' , e do fator de perda dielétrica ϵ'' , e a descrição do capacitor utilizado para conter as amostras de feijão durante as medições, encontram-se em Berbert & Stenning (1999). Para a determinação do teor de água, utilizou-se o método padrão de estufa, $105 \pm 3^\circ C$, durante 24 h, 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 o seu teor de água de acordo com o método padrão de estufa (Brasil, 1992). Este procedimento permitiu verificar-se alterações inferiores a 0,2 ponto percentual b.u. para todo o intervalo de teor de água avaliado. Depois que todas as medições elétricas de determinada amostra haviam terminado, determinava-se sua massa específica aparente usando-se uma balança de peso hectolítrico modelo *Easi-way* fabricada pela *Farm-Tec*, UK.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Adaptação para o intervalo de radiofrequências, do método originalmente proposto para frequências de microondas por Kent & Meyer (1982)

Berbert (1995) avaliou, para sementes de trigo, a adaptação feita por Lawrence & Nelson (1993) ao método originalmente proposto por Meyer & Schilz (1980) para determinação *on-line* do teor de água de produtos granulados. A adaptação consistiu não na utilização da função $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ mas, sim, na utilização do quadrado da diferença desta função. Além disso, inclui-se na análise de regressão o logaritmo neperiano do fator de perda dielétrica, resultando em modelos dielétricos capazes de estimar o teor de água do trigo com erro-padrão da estimativa e erro máximo de calibração e predição de 0,6 ponto percentual. Uma outra adaptação ao método de Meyer & Schilz foi proposta por Kent & Meyer (1982) ao verificarem que a razão ξ dada pela Eq. 1, era menos sensível às variações no valor da massa específica aparente que a função de Meyer & Schilz, $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$, para frequências de microondas e para materiais com pequena perda dielétrica, ou seja, para $[(\epsilon'-1)/\epsilon''] \ll 0,1$.

Para se adaptar o método de Kent & Meyer (1982), é necessário considerar-se que, para o feijão, não é possível se obter um modelo único a partir da função de Meyer & Schilz, e que tenha sido independente da massa específica aparente do produto. Assim, para a função de Kent & Meyer (1982) escolheram-se dois pares de frequência de oscilação, 85 e 100 kHz e 2 e 5 MHz, para as quais os valores de $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ são $\leq 16,0\%$ b.u., $\leq 20,6\%$ b.u. e $11,5\%$ b.u., $\leq U < 16,0\%$ b.u., respectivamente.

Utilizou-se o método de regressão linear para correlacionar o quadrado da diferença dos valores de ξ , a 2 e 5 MHz, e o logaritmo neperiano do fator de perda dielétrica, $\ln(\epsilon'')_{2MHz}$, ao teor de água das amostras de feijão da variedade Campeão-3, de forma similar àquela proposta por Kent & Meyer (1982) e se obteve a seguinte equação de calibração, com $r^2 = 0,89$. A utilização da Eq. 6 no cálculo do teor de água do feijão no intervalo $11,5\%$ b.u. $\leq U < 16,0\%$ b.u., resulta em erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,5 e 1,1 pontos percentuais de umidade, respectivamente.

$$U = 15,0115 + 2,4952 \ln(\epsilon'')_{2MHz} + 1,1343 \times \left[\left(\frac{\epsilon'-1}{\epsilon''} \frac{2\sqrt{\epsilon'}}{1+\sqrt{\epsilon'}} \right)_{5MHz} - \left(\frac{\epsilon'-1}{\epsilon''} \frac{2\sqrt{\epsilon'}}{1+\sqrt{\epsilon'}} \right)_{2MHz} \right]^2 \quad (6)$$

Para teores de água no intervalo $16,7\%$ b.u. $\leq U \leq 20,6\%$ e frequências de 85 e 100 kHz, obteve-se a equação seguinte para o cálculo do teor de água do feijão, a partir de valores medidos da função de Kent & Meyer. A Eq. 7 tem coeficiente de correlação igual a 0,86 e é capaz de estimar os valores de U com erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,5 e 1,0 ponto percentual, respectivamente. Não houve melhoria no grau de acurácia quando os valores dos erros obtidos com o modelo dielétrico de Meyer & Schilz são comparados com aqueles obtidos por meio da função de Kent & Meyer. As Eqs. (6) e (7)

foram então utilizadas para se estimar o teor de água de amostras de feijão e os resultados são mostrados na Figura 1, na qual se vê também 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.

$$U = 19,4985 + 0,9303 \ln(\epsilon'')_{85\text{kHz}} - 40,7735 \times \left[\left(\frac{\epsilon'-1}{\epsilon''} \frac{2\sqrt{\epsilon'}}{1+\sqrt{\epsilon'}} \right)_{100\text{kHz}} - \left(\frac{\epsilon'-1}{\epsilon''} \frac{2\sqrt{\epsilon'}}{1+\sqrt{\epsilon'}} \right)_{85\text{kHz}} \right]^2 \quad (7)$$

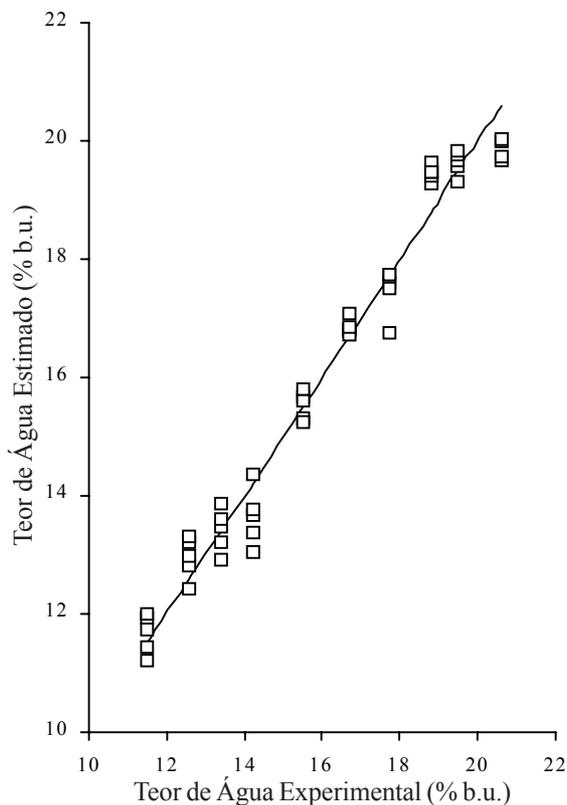


Figura 1. Gráfico de correspondência entre os valores de teores de água determinados pelo método padrão de estufa e aqueles estimados pelas Eqs. (6) e (7) para amostras de feijão da variedade Campeão-3

Adaptação para o intervalo de radiofrequências, do método originalmente proposto para frequências de microondas por Powell et al. (1988)

As curvas que representam a variação da função η (Eq. 2) e o teor de água para amostras de sementes de feijão da variedade Campeão-3, podem ser classificadas em três tipos, como mostra a Figura 2.

Para frequências de 75 a 200 kHz, as curvas podem ser representadas por funções quárticas com $r^2 = 0,96$ e são côncavas em relação ao eixo das abscissas, ou seja, os valores inicialmente aumentam, atingem um valor máximo e começam a diminuir. Os valores mínimos da função ($\approx 0,97$) ocorrem para teor de água de 20,6% b.u. e os valores máximos ($\approx 1,22$) para 13,4 e 14,2% b.u. A curva e os dados experimentais apresentados na Figura 2, para esse intervalo, mostram especificamente a

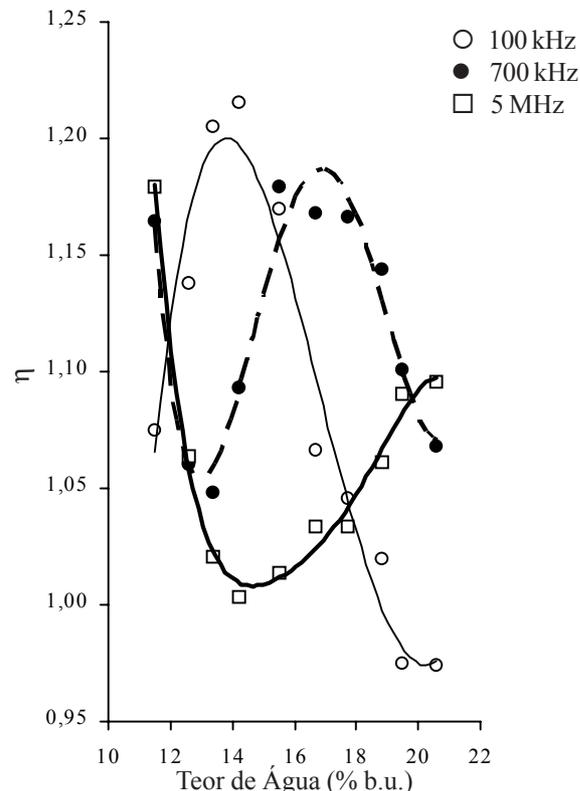


Figura 2. Variação da função de Powell, $\eta = \{[(\epsilon'-1)^{1/3}] / (\epsilon'')^{1/2}\}$, em função do teor de água, para amostras de feijão da variedade Campeão-3 e valores indicados de frequência, a 20 ± 1 °C e $66 \pm 2\%$ de umidade relativa

variação de η em função do teor de água para a frequência de 100 kHz. Para frequências de 300 kHz a 2 MHz, as curvas se assemelham a uma função periódica e também podem ser representadas por funções quárticas com $r^2 = 0,96$. Inicialmente, a curva é côncava para cima, tornando-se côncava para baixo para teores de água próximos a 15,0% b.u. A curva e os dados experimentais apresentados na Figura 2, para esse intervalo indicam, especificamente, a variação de η em função do teor de água para a frequência de 700 kHz. Para frequências de 3 a 5 MHz, as curvas podem ser representadas por funções quárticas com $r^2 = 0,98$ e são côncavas para cima, ou seja, os valores inicialmente diminuem, atingem um valor mínimo e começam a aumentar. Os valores mínimos da função ($\approx 1,00$) ocorrem para teores de água próximos a 14,2% b.u. e os valores máximos ($\approx 1,18$) para 11,5% b.u. A curva e os dados experimentais apresentados na Figura 2, para esse intervalo apontam, especificamente, a variação de η em função do teor de água para a frequência de 5 MHz.

A análise dos dados experimentais e das curvas apresentadas na Figura 2, permite concluir-se que a função η não é unívoca para nenhuma das frequências estudadas entre 75 kHz e 5 MHz. Portanto, para sementes de feijão não será possível obter-se um modelo único a partir da função de Powell, e que seja independente da massa específica aparente do produto para todo o intervalo de teor de água estudado; além disso, as curvas obtidas não permitem nem mesmo se escolher duas frequências de oscilação, para dois intervalos de teor de água, nos quais os valores de η sejam unívocos.

Powell et al. (1988) afirmaram que a razão η seria independente da massa específica aparente de determinado produto granular para maiores intervalos de ρ que aquele observado para a função inalterada de Meyer & Schilz, $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$. Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir-se que o grau de influência da massa específica foi realmente menor na função proposta por Powell et al. (1988) que naquela proposta por Meyer & Schilz (1980). Apresenta-se, na Figura 3A e B, a variação de η em função da massa específica aparente para amostras de feijão Campeão-3, para frequências de 5 MHz e

100 kHz, e para teores de água nos intervalos 11,5% b.u. $\leq U \leq 14,2\%$ b.u. e 15,5% b.u. $\leq U \leq 20,6\%$ b.u., respectivamente. É interessante observar que, apesar de ser praticamente independente de ρ , a função proposta por Powell et al. (1988) não é unívoca para teores de água entre 11,5 e 18,8% b.u. e, a partir desse valor, deixa de apresentar sensibilidade à variação no teor de água das amostras. Constata-se, também, que pequenas alterações no teor de água provocam alterações diminutas no valor desta função, quando comparadas com o efeito provocado nos valores da função de Meyer & Schilz, como observado por Berbert (1995). Este fato revela que a função $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$ é mais sensível à quantidade de água presente no produto e, portanto, mais adequada para se estimar o seu teor de água. Por esta razão e devido ao fato da função η não ser unívoca, não se derivará uma equação de calibração utilizando-se a função proposta por Powell et al. (1988).

Adaptação para o intervalo de radiofrequências, do método originalmente proposto para frequências de microondas por Zhang & Okamura (2001)

Ao contrário dos modelos dielétricos já apresentados, que se baseavam na medição de ϵ' e ϵ'' em uma única ou duas frequências, o método desenvolvido por Zhang & Okamura (2001) utiliza apenas a medição de ϵ' em duas frequências de oscilação. O primeiro passo para se avaliar sua aplicabilidade na estimativa do teor de água do feijão em radiofrequências, é determinar se a função Γ é unívoca para as condições estudadas.

Apresentam-se, na Figura 4, os pontos experimentais que reproduzem a variação de Γ em relação ao teor de água para amostras de sementes de feijão da variedade Campeão-3, para cinco pares de frequências. Vê-se que a função não é unívoca para nenhum dos pares de frequências; para 75 e 100 kHz, verifica-se que a função Γ praticamente independe do teor de água. O fato da função Γ não ser unívoca para nenhum dos pares de frequência avaliados neste trabalho, não significa que ela não possa ser utilizada na derivação de um modelo dielétrico que seja independente da massa específica aparente dos grãos. Se for possível desenvolver um protótipo de medidor de teor de água de produtos agrícolas que possa operar em múltiplas frequências, poder-se-á utilizar dois pares de frequência para diferentes intervalos de teor de água do feijão na derivação do modelo. Desta forma, escolheram-se dois pares de frequência (1 MHz, 5 MHz) e (75 kHz, 5 MHz) e dois intervalos de teor de água 11,5% b.u. $\leq U \leq 14,2\%$ b.u. e 15,5% b.u. $\leq U \leq 20,6\%$ b.u., respectivamente, para integrar o modelo de Zhang & Okamura. Fez-se a escolha desses intervalos considerando-se que para os grãos mais úmidos, a função Γ , além de ser unívoca, é mais sensível a variações no teor de água para o par de frequências (75 kHz, 5 MHz) que para os demais. Para os grãos mais secos, o par de frequências (1 MHz, 5 MHz), resulta em valores unívocos da função Γ e que estão mais distanciados, no eixo das ordenadas, dos valores de $\Gamma_{(75 \text{ kHz}, 5 \text{ MHz})}$. Esta diferença de valores pode ser muito útil na obtenção de resultados mais exatos e precisos durante o desenvolvimento e calibração de um protótipo de medidor do teor de água.

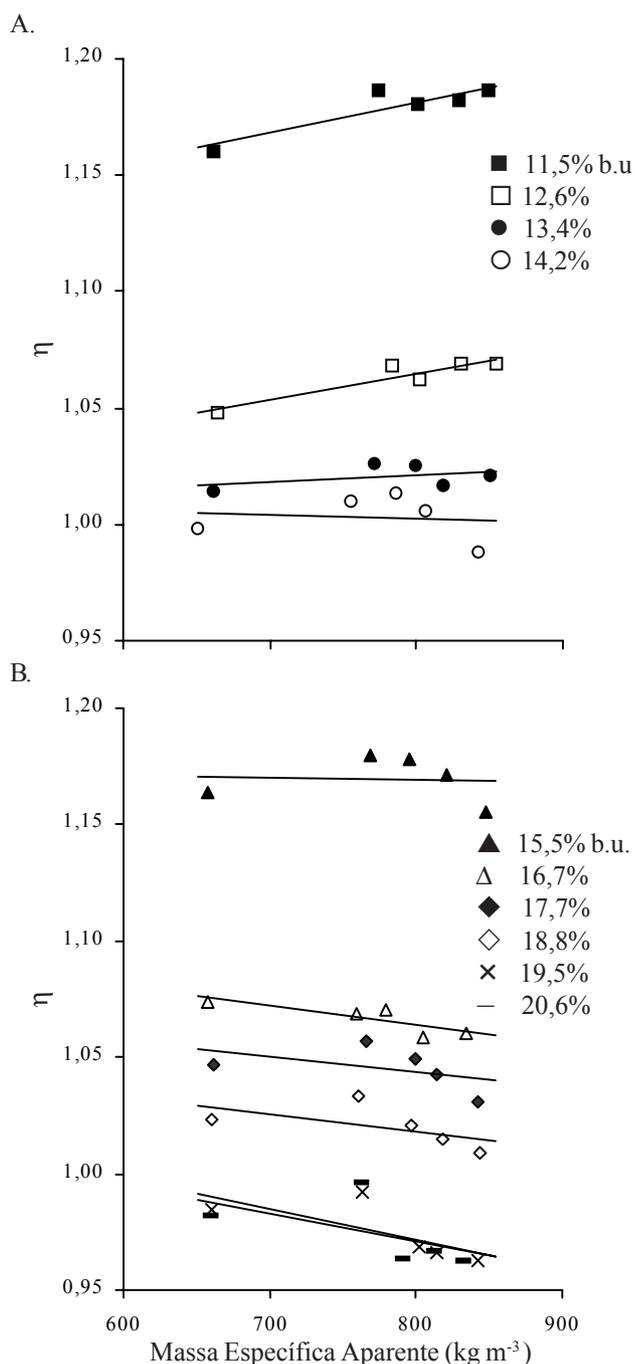


Figura 3. Valores da função de Powell, $\{[(\epsilon'-1)/\epsilon'']^{1/3}/(\epsilon'')^{1/2}\}$, a 100 kHz (A) e 5 MHz (B), em função da massa específica aparente para amostras de feijão da variedade Campeão-3 e valores indicados de teor de água, a 20 ± 1 °C e $66 \pm 2\%$ de umidade relativa

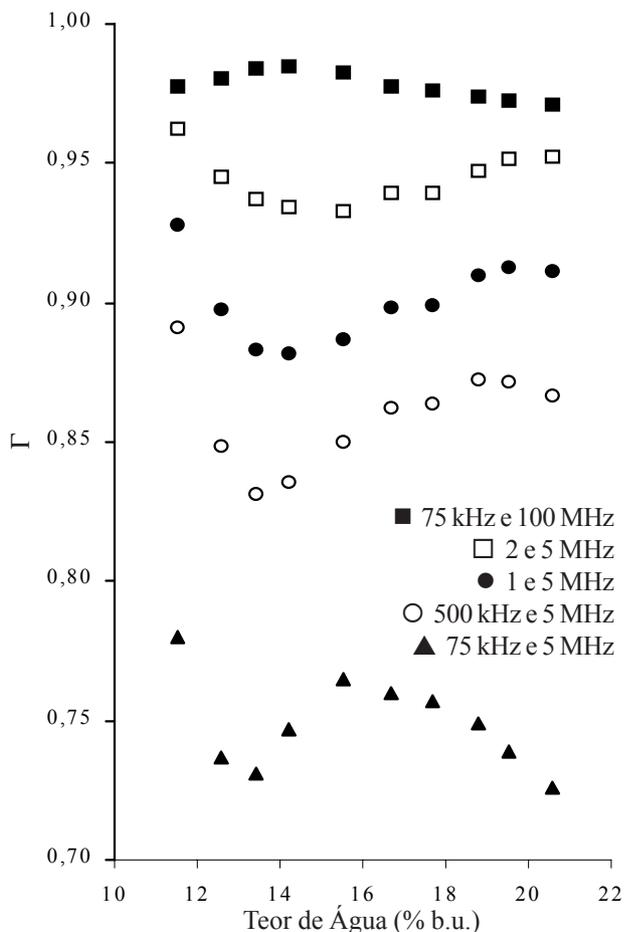


Figura 4. Variação da função Γ em relação do teor de água, para amostras de feijão da variedade Campeão-3 e valores indicados de pares de frequências, a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ e $66 \pm 2\%$ de umidade relativa

Apresenta-se, na Figura 5A, a variação no valor da função Γ em função da massa específica aparente do produto ρ , para $f_1 = 1 \text{ MHz}$ e $f_2 = 5 \text{ MHz}$ e para teores de água no intervalo $11,5\% \text{ b.u.} \leq U \leq 14,2\% \text{ b.u.}$

Observa-se que o valor da função é praticamente independente de ρ para grãos mais secos, mas se verifica redução na sensibilidade da função quando o teor de água aumenta de 13,4 para 14,2% b.u. As retas que representam a taxa de variação de Γ em função de ρ , têm declividade inferior a $-2,0 \times 10^{-5}$. A variação correspondente para teores de água no intervalo entre $15,5\% \text{ b.u.} \leq U \leq 20,6\% \text{ b.u.}$, para o par de frequências (75 kHz e 5 MHz) é mostrada na Figura 5B e, para grãos mais úmidos, Γ é mais sensível à variação de ρ ; entretanto, a maior declividade das retas mostradas nesta figura é igual a $-9,0 \times 10^{-5}$.

Para teores de água entre 11,5 e 14,2% b.u. e frequências de 1 e 5 MHz, obteve-se a seguinte equação para o cálculo do teor de água do feijão a partir de valores medidos da função Γ . A Eq. 8 tem coeficiente de correlação igual a 0,89 e é capaz de estimar os valores de U com erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,4 e 0,6 ponto percentual, respectivamente. Portanto observa-se, para grãos mais secos, uma melhora sensível na estimativa do teor de água quando se compara o erro máximo obtido com os valores obtidos nos demais modelos dielétricos estudados.

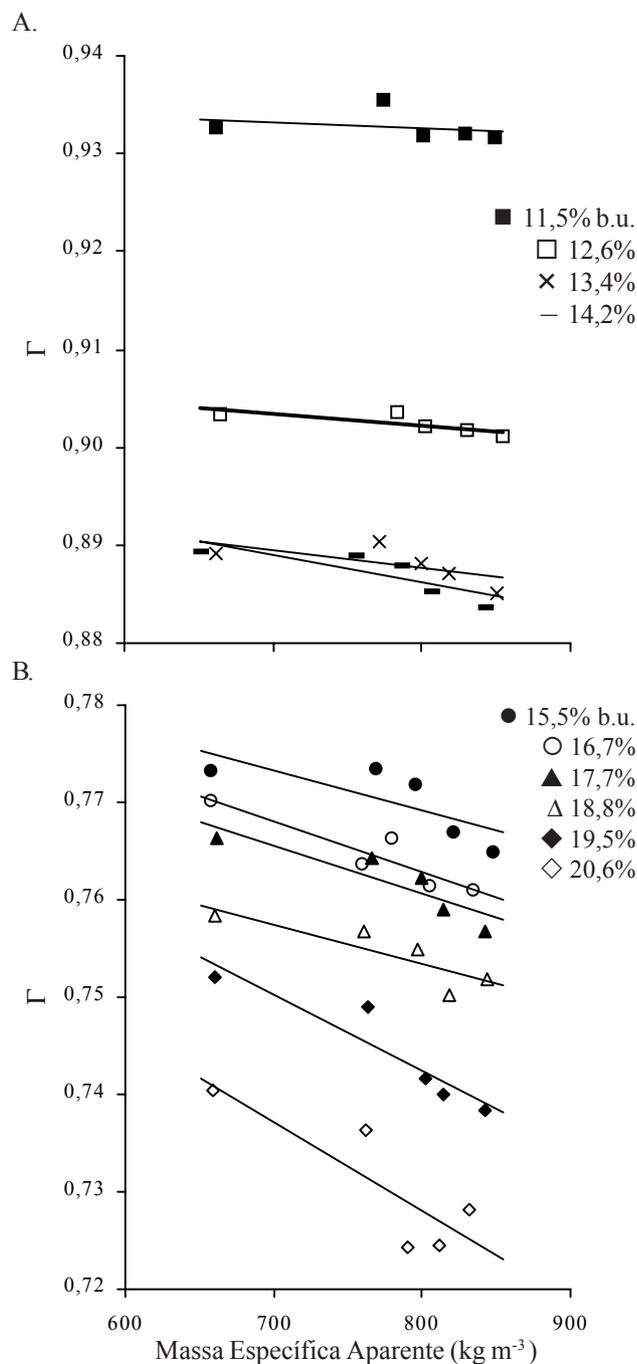


Figura 5. Variação da função Γ para o par de frequências (A) 1 MHz e 5 MHz, e (B) 75 kHz e 5 MHz, em função da massa específica aparente, para amostras de feijão da variedade Campeão-3 e valores indicados de teor de água, a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ e $66 \pm 2\%$ de umidade relativa

$$U = 58,401 - 50,667 \frac{\sqrt{\epsilon'_{5\text{MHz}} - 1}}{\sqrt{\epsilon'_{1\text{MHz}} - 1}} \quad (8)$$

Utilizou-se o método de regressão linear para correlacionar a função Γ ao teor de água ($15,5\% \text{ b.u.} \leq U \leq 20,6\% \text{ b.u.}$) das amostras de feijão da variedade Campeão-3, de forma similar àquela proposta por Zhang & Okamura (2001) e se obteve a seguinte equação de calibração, com $r^2 = 0,83$. A utilização da Eq. 9 na estimativa do teor de água resulta em erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,7 e 1,5 pontos percentuais,

respectivamente. Para os grãos mais úmidos constatou-se aumento no valor do erro máximo quando se emprega a função Γ . As Eqs. (8) e (9) foram então utilizadas para se estimar o teor de água de amostras de feijão e os resultados são mostrados na Figura 6, na qual se tem o gráfico de correspondência entre os valores experimentais e estimados de teor de água.

$$U = 101,367 - 111,086 \frac{\sqrt{\epsilon'_{5\text{MHz}} - 1}}{\sqrt{\epsilon'_{75\text{kHz}} - 1}} \quad (9)$$

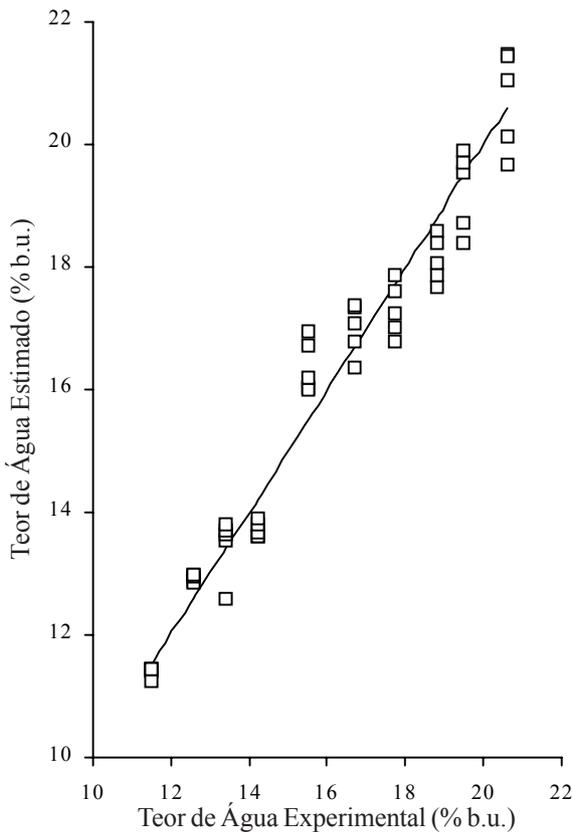


Figura 6. Gráfico de correspondência entre os valores de teores de água determinados pelo método padrão de estufa e aqueles estimados pelas Eqs. (8) e (9) para amostras de feijão da variedade Campeão-3

Berbert (1995) observou que a introdução do logaritmo neperiano do fator de perda dielétrica $\ln(\epsilon'')$ no modelo de Meyer & Schilz (1980) melhorou o desempenho do modelo dielétrico na estimativa do teor de água do trigo. No presente caso, combinando-se a função Γ correspondente ao par de frequência 1 e 5 MHz com o $\ln(\epsilon'')$ a 5 MHz, obteve-se a equação apresentada a seguir, com $r^2 = 0,90$. A Eq. 10 permite se estimar os valores de U, entre 11,5 e 14,2% b.u., com erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,3 e 0,5 ponto percentual, respectivamente. Observou-se também redução nos valores dos erros quando se introduziu o valor de $\ln(\epsilon'')$ no modelo de Zhang & Okamura (2001) para as condições estudadas.

$$U = 56,785 + 0,126 \ln(\epsilon'')_{5\text{MHz}} - 48,731 \frac{\sqrt{\epsilon'_{5\text{MHz}} - 1}}{\sqrt{\epsilon'_{1\text{MHz}} - 1}} \quad (10)$$

Para teores de água entre 15,5% e 20,6% b.u., e frequências de 75 kHz e 5 MHz, obteve-se a equação seguinte para o cálculo do teor de água do feijão, a partir de valores medidos da função Γ . A Eq. 11 tem coeficiente de correlação igual a 0,85 e é capaz de estimar os valores de U com erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,7 e 1,2 pontos percentuais, respectivamente. Observa-se que, para grãos mais úmidos, também ocorreu melhora na estimativa do teor de água em relação à Eq. 9. O desempenho das Eqs. (10) e (11) na estimativa do teor de água de amostras de feijão, é mostrado na Figura 7, na qual se vê o gráfico de correspondência entre os valores experimentais e estimados de teor de água.

$$U = 111,432 - 2,127 \ln(\epsilon'')_{5\text{MHz}} - 125,612 \frac{\sqrt{\epsilon'_{5\text{MHz}} - 1}}{\sqrt{\epsilon'_{75\text{kHz}} - 1}} \quad (11)$$

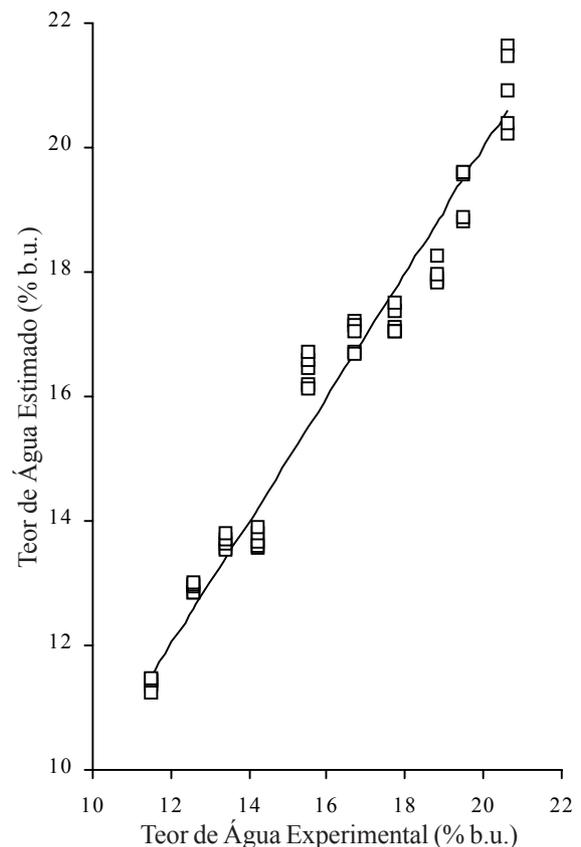


Figura 7. Gráfico de correspondência entre os valores de teores de água determinados pelo método padrão de estufa e aqueles estimados pelas Eqs. (10) e (11) para amostras de feijão da variedade Campeão-3

Avaliou-se também o seguinte modelo dielétrico para o cálculo do teor de água do feijão e que incorpora a massa específica aparente (ρ) como variável independente. O erro-padrão da estimativa e o erro máximo das diferenças entre os valores medidos e estimados do teor de água, utilizando-se a Eq. 12, foram de 0,6 e 1,5 pontos percentuais, respectivamente. Teoricamente, para as condições estudadas neste trabalho, a Eq. 12 deveria resultar em valores estimados de teor de água com maior grau de acurácia.

Tabela 1. Comparação de diversos modelos que utilizam parâmetros dielétricos para a estimativa do teor de água de sementes de feijão, variedade Campeão-3, independentemente da massa específica aparente do produto, a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ e $66 \pm 2\%$ de umidade relativa

Modelo Dielétrico	Variáveis	r ²	Frequência (MHz)	Teor de Água (% b.u.)	Erro-Padrão da Estimativa	Erro Máximo
McFarlane (1987)	ϵ'	0,84	0,5 e 5,0	11,5 a 20,6	1,2	3,3
Lawrence & Nelson (1993)	ϵ' , $\ln(\epsilon'')$	0,91	0,5 e 5,0	11,5 a 20,6	1,0	1,9
Kraszewski & Kulinski (1976)	ϵ' , ϵ''	–	5,0	11,5 a 20,6	1,3	3,5
Meyer & Schilz (1980)	ϵ' , ϵ''	0,83	5,0	11,5 a 15,5	0,6	1,2
Meyer & Schilz (1980)	ϵ' , ϵ''	0,78	0,085	16,7 a 20,6	0,7	1,3
Meyer & Schilz (1980) e Lawrence & Nelson (1993)	ϵ' , ϵ'' e $\ln(\epsilon'')$	0,90	2 e 5	11,5 a 15,5	0,5	1,0
Meyer & Schilz (1980) e Lawrence & Nelson (1993)	ϵ' , ϵ'' e $\ln(\epsilon'')$	0,90	0,085 e 0,1	16,7 a 20,6	0,5	0,9
Kent & Meyer (1982) e Lawrence & Nelson (1993)	ϵ' , ϵ'' e $\ln(\epsilon'')$	0,89	2 e 5	11,5 a 15,5	0,5	1,1
Kent & Meyer (1982) e Lawrence & Nelson (1993)	ϵ' , ϵ'' e $\ln(\epsilon'')$	0,86	0,085 e 0,1	16,7 a 20,6	0,5	1,0
Zhang & Okamura (2001)	ϵ'	0,89	1 e 5	11,5 a 14,2	0,4	0,6
Zhang & Okamura (2001)	ϵ'	0,83	0,075 e 5	15,5 a 20,6	0,7	1,5
Zhang & Okamura (2001) e Lawrence & Nelson (1993)	ϵ' e $\ln(\epsilon'')$	0,90	1 e 5	11,5 a 14,2	0,3	0,5
Zhang & Okamura (2001) e Lawrence & Nelson (1993)	ϵ' e $\ln(\epsilon'')$	0,83	0,075 e 5	15,5 a 20,6	0,7	1,2

Obs.: O erro-padrão da estimativa e o erro máximo estão expressos em ponto percentual de umidade, b.u.

$$U = 4,2241 \epsilon'_{5\text{MHz}} - 1,3911 \epsilon'_{0,5\text{MHz}} - 0,0185 \rho + 15,5437 \quad (12)$$

Para efeitos comparativos apresenta-se, na Tabela 1, o resumo do desempenho dos diversos modelos dielétricos avaliados até o momento, para o cálculo do teor de água de sementes de feijão, independentemente de sua massa específica aparente (ρ). Em termos de acurácia, os valores apresentados nessa Tabela devem ser comparados com aqueles referentes aos obtidos empregando-se a Eq. 12, que incorpora a massa específica aparente como variável independente; no entanto, mesmo com a possibilidade de uma medição independente de ρ pela técnica de atenuação de raios- γ , verifica-se que há modelos capazes de estimar o teor de água do feijão com melhor grau de acurácia que a Eq. 12.

É interessante notar que, praticamente, todos os modelos discutidos apresentaram melhor desempenho na estimativa do teor de água do trigo que para o feijão: Berbert et al. (1999) elaboraram uma tabela similar à Tabela 1, para sementes de trigo, e constataram que os erros foram consistentemente menores. Além disso, foi possível utilizar-se um mesmo modelo dielétrico em todo o intervalo de umidade estudado. Uma das possíveis explicações para essa desigualdade, de acordo com Kupfer (1996), seriam as diferenças entre as massas específicas dos produtos. Para o trigo, a massa específica aparente, para teores de água entre 10,5 e 22,0% b.u., variou entre 666 e 873 kg m⁻³ (Berbert, 1995). Para o feijão, a massa específica aparente variou no intervalo $756 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho \leq 854 \text{ kg m}^{-3}$ para teores de água entre 11,5 e 20,6% b.u. Portanto, no caso do feijão, é pouco provável que a disparidade no desempenho dos modelos dielétricos se deva aos valores obtidos de ρ , pois o intervalo de massa específica para o feijão está contido no intervalo referente ao trigo. Há que se estudar as propriedades dielétricas de outras variedades de feijão e de diversos outros produtos, para então se avaliar a possível causa da ocorrência dessa diferença de desempenho, no caso dos dois produtos estudados.

CONCLUSÕES

O melhor desempenho geral na estimativa do teor de água de sementes de feijão foi obtido com os dois modelos em que se utilizam duas frequências e que foram adaptados a partir da combinação das funções de Meyer & Schilz (1980), $[(\epsilon'-1)/\epsilon'']$, e Kent & Meyer (1982), $[(\epsilon'-1)/\epsilon''] / [(2\sqrt{\epsilon'})/(1+\sqrt{\epsilon'})]$, com o método proposto por Lawrence & Nelson (1993). Ambos os modelos apresentam desempenho similar e resultaram em erro-padrão da estimativa e erro máximo de 0,5 e 1,0 ponto percentual, respectivamente.

LITERATURA CITADA

- Berbert, P.A. On-line density-independent moisture content measurement of hard winter wheat using the capacitance method. Silsoe: Cranfield University, 1995. 227p. Tese Doutorado
- 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.; Stenning, B.C.; Faroni, L.R.D.; Queiroz, D.M. Avaliação de três métodos para determinação indireta do teor de água do trigo. Engenharia na Agricultura, Viçosa, v.7, n.2, p.57-69, 1999.
- Brasil. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Regras para análise de sementes. Brasília, DF, 1992. 365p.
- Griffin, J.D.; Skochdopole, R.E. Plastic foams. In: Baer E. (Ed.). Engineering design for plastics. New York: Reinhold Publishing Corporation, Polymer Science and Engineering Series, 1964. p.995-1071.
- Kent, M., Meyer, W. A density-independent microwave moisture meter for heterogeneous foodstuffs. Journal of Food Engineering, Chicago, v.1, p.31-42, 1982.
- King, R.J. On-Line moisture and density measurement of foods using microwave sensors. In: IV Conference on Food Processing Automation, 1995, Chicago. Proceedings. St. Joseph: ASAE, 1995. p.127-138.

- Kraszewski, A.W, Kulinski, S. An improved microwave method of moisture content measurement and control. IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Warsaw, v.23, n.4, p.364-370, 1976.
- Kraszewski, A.W.; Nelson, S.O. Density-independent moisture determination in wheat by microwave measurement. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.34, n.4, p.1776-1783, 1991.
- Kraus, J.D.; Carver, K.R. Electromagnetics. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha Ltd, 1973. 828p.
- Kupfer, K. Possibilities and limitations of density-independent moisture measurement with microwaves. In: Kraszewski, A.W. (ed.). Microwave aquametry – Electromagnetic wave interaction with water-containing materials. New York: IEEE Press, Emerging Technologies Series, 1996. p.313-327.
- Lawrence, K.C.; Nelson, S.O. Radio-frequency density-independent moisture determination in wheat. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.36, n.2, p.477-483, 1993.
- 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.
- Nelson, S.O. Density dependence of the dielectric properties of wheat and whole-wheat flour. Journal of Microwave Power, Edmonton, v.19, n.1, p.55-64, 1984.
- 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 ASAE, St. Joseph, v.31, n.6, p.1875-81, 1988.
- Sovlukov, A.S. Microwave method for determination of water content in a substance independent of its dielectric permittivity. In: International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, 4, 2001, Weimar. Proceedings. Weimar: MFPA an der Bauhaus-Universität, 2001. p.446-453.
- Trabelsi, S.; Kraszewski, A.W.; Nelson, S.O. Optimizing a universal calibration for industrial microwave moisture sensors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Marshall, v.47, n.3, p.613-622, 1998.
- Trabelsi, S.; Nelson, S.O. Density-independent functions for on-line microwave moisture meters: a general discussion. Measurement Science and Technology, Bristol, v.9, p.570-578, 1998.
- 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.