



# Adaptação da função dielétrica $\{\epsilon''/[\epsilon'(a_f \epsilon' - \epsilon'')]\}$ para determinação do teor de água em sementes de feijão por radiofrequências<sup>1</sup>



Pedro A. Berbert<sup>2</sup>, Daniel M. de Queiroz<sup>3</sup>, Elias F. de Sousa<sup>2</sup>, Edenio Detmann<sup>2</sup>,  
Alexandre P. Viana<sup>2</sup> & Rafael G. Dionello<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Trabalho realizado com apoio financeiro da International Foundation for Science (IFS), CNPq, FAPEMIG, FINEP/ RECOPE e FAPERJ

<sup>2</sup> LEAG/LMGV/UENF. Av. Alberto Lamego 2000, Parque Califórnia, CEP 28013-602 Campos dos Goytacazes, RJ. E-mail: pberbert@uenf.br

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

Protocolo 30 - 17/2/2003 - Aprovado em 1/3/2004

**Resumo:** O desenvolvimento de modelos dielétricos universais para se estimar o teor de água de grãos e sementes é, atualmente, uma das principais tendências da engenharia de desenvolvimento de protótipos de medidores on-line. Esses modelos permitem a utilização de um único algoritmo, construído a partir de um mesmo tipo de função de calibração, para se calcular o teor de água de grãos em movimento sem a influência do fluxo de massa. No presente trabalho avaliou-se o desempenho de um modelo dielétrico originalmente desenvolvido para freqüências de microondas para estimar o teor de água em sementes de feijão on-line e que foi derivado de uma função do tipo  $\zeta = F\{\epsilon''/[\epsilon'(a_f \epsilon' - \epsilon'')]\}$ , em que  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  representam a permissividade elétrica relativa e o fator de perda dielétrica dos grãos, respectivamente, e  $a_f$  é uma constante que depende apenas da freqüência de oscilação. A medição dos parâmetros dielétricos foi feita utilizando-se amostras de feijão com teor de água no intervalo 11,5% b.u.  $\leq U \leq$  20,6% b.u. e massa específica entre 756 e 854 kg m<sup>-3</sup>. A adaptação, para radiofrequências, do modelo dielétrico derivado a partir da função  $\zeta$ , permitiu estimar-se o teor de água do feijão (13,4% b.u.  $\leq U \leq$  19,5% b.u.) com erro padrão da estimativa e erro máximo de 0,6 e 1,4 pontos percentuais, respectivamente.

**Palavras-chave:** instrumentação, modelos dielétricos, *Phaseolus vulgaris*

## Adjustment of the microwave dielectric function $\{\epsilon''/[\epsilon'(a_f \epsilon' - \epsilon'')]\}$ to estimate the moisture content of common bean seeds at radiofrequencies

**Abstract:** The development of universal dielectric models to estimate the moisture content of grains and seeds is one of the main trends in the field of engineering for the production of on-line moisture meter prototypes. These models allow the use of a single algorithm, derived from a unique calibration equation, to calculate moisture content of moving grain independently of bulk density or mass flow rate. In this paper, the performance of a dielectric model originally developed for microwave frequencies has been assessed for estimating moisture content of common bean seeds at radiofrequencies. The model was derived from the following function,  $\zeta = F\{\epsilon''/[\epsilon'(a_f \epsilon' - \epsilon'')]\}$ , in which  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$  are the relative permittivity and dielectric loss factor, respectively, and  $a_f$  is an extrinsic parameter dependent on the frequency of oscillation. Measurement of dielectric parameters was performed using samples varying in moisture content from 11.5 to 20.6% w.b., and bulk densities in the range from 756 e 854 kg m<sup>-3</sup>. The adaptation to radiofrequencies of a microwave dielectric model derived from the density independent function  $\zeta$  produced a model capable of estimating the moisture content (w.b.) of common bean seeds with a standard error of estimate and maximum error of 0.6 and 1.4 percentage points.

**Key words:** instrumentation, common bean, dielectric models, *Phaseolus vulgaris*

## INTRODUÇÃO

Na Conferência Internacional sobre a Interação de Ondas Eletromagnéticas com a Água e Substâncias Úmidas, realizada de 13 a 16/05/2001 em Weimar, Alemanha, dois dos principais temas em debate, foram: 1) a necessidade de se obter modelos dielétricos universais de calibração para uso industrial na determinação on-line do teor de água de produtos agrícolas, e 2) as dificuldades que vêm sendo encontradas para que os resultados científicos alcançados no desenvolvimento de sensores que operam em frequências de microondas, sejam efetivamente incorporados pela indústria (Kupfer & Hübner, 2001).

No primeiro caso, a maioria dos modelos dielétricos já desenvolvidos que relacionam o teor de água de produtos agrícolas granulares úmidos com suas propriedades dielétricas, notadamente com a permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  e o fator de perda dielétrica  $\epsilon''$ , não pode ser considerada modelos universais de calibração. A principal razão para isto reside no fato dos modelos terem sido derivados para condições específicas, tais como: tipo de grão, frequência de oscilação do campo, equipamento e metodologia utilizados na determinação das propriedades dielétricas, geometria dos sensores e intervalo de massa específica estudado. De acordo com Trabelsi et al. (2001) seriam três os principais fatores que limitariam a utilização da tecnologia disponível para a estimativa on-line do teor de água de grãos, a partir de seus parâmetros dielétricos medidos em frequências de microondas: custo, procedimentos complexos de calibração e impossibilidade de se utilizar a mesma equação de calibração em instrumentos diferentes.

Para pesquisadores norte-americanos, os modelos já poderiam ser considerados universais se permitissem estimar, com o mesmo algoritmo, o teor de água de cereais como trigo, centeio, aveia, cevada e milho, seus principais produtos, além da soja, utilizando-se diferentes princípios de medição dos parâmetros dielétricos. No caso brasileiro, a complexidade na obtenção de um modelo universal de calibração é bem maior, pois seria necessário encontrar-se funções similares que relacionassem o teor de água aos parâmetros dielétricos de produtos com estrutura celular e composição química muito diferentes, como é o caso do café em coco, café despolpado, café beneficiado, arroz, feijão e milho, além do trigo, soja e sorgo. Neste caso, o intervalo de variação da massa específica aparente desses produtos é significativamente maior, tornando-se o principal fator limitante na obtenção de um modelo universal para determinação on-line do seu teor de água.

A construção de um protótipo para determinação on-line do teor de água e sua posterior avaliação, tanto em laboratório quanto no campo, só será viável se for possível desenvolver modelos, mesmo que não-universais, que relacionem uma ou duas propriedades dielétricas, medidas em uma única ou duas frequências de oscilação do campo, com a quantidade de água presente no produto.

Berbert (1995) desenvolveu modelos dielétricos de calibração para três variedades de trigo (*Triticum aestivum* L.) que permitem medir o teor de água de uma coluna de grãos em movimento sem que haja necessidade da retirada de amostras

do produto, no intervalo entre 11 e 22% b.u., com grau de acurácia de  $\pm 0,3$  pontos percentuais de umidade. O modelo que apresentou melhores resultados, em radiofrequências, é uma variação do modelo proposto por Meyer & Schilz (1980), para frequências de microondas, que consiste na derivação de uma equação que correlacione a função  $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$  ao teor de água e que seja independente do fluxo de massa ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).

Para o café (*Coffea arabica* L.) despolpado determinaram-se as propriedades dielétricas das variedades Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho e Mundo Novo (Berbert et al., 2001) e, para o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), mediram-se as mesmas propriedades para a variedade Campeão-3 (Berbert et al., 2002). A análise dos dados indica que funções semelhantes às de Meyer & Schilz (1980) não permitem eliminar-se a influência da massa específica aparente na determinação do teor de água, o que inviabiliza sua utilização, para condições semelhantes de frequência, teor de água e massa específica aparente, em aplicações on-line com o mesmo grau de acurácia obtido para o trigo. Sendo assim, antes da construção do protótipo, será necessário continuar investigando as propriedades dielétricas dos principais produtos agrícolas produzidos no Brasil, avaliar o grau de influência da massa específica aparente sobre os valores de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  e verificar qual o intervalo ótimo de oscilação do campo eletromagnético em que se deverá operar o sensor.

Quanto ao segundo aspecto mais debatido na Conferência mencionada anteriormente, ou seja, a dificuldade de transferir a tecnologia já desenvolvida em Universidades e Centros de Pesquisa para a indústria de sensores e controladores automáticos usados em operações de pré-processamento de grãos e processamento de alimentos, verificou-se que um dos principais empecilhos continua sendo o custo final de sensores que operam em frequências de microondas. Representantes da indústria, tanto dos EUA quanto de países da Europa, alegam que, sob a perspectiva do mercado, ainda não há uma relação custo/benefício que seja atrativa para adoção de controladores automáticos de processos que usem esse tipo de sensor.

Desta forma, não é infundado considerar-se que, se não há mercado para sensores operando em frequências de microondas nos países desenvolvidos, dificilmente o haveria nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Sendo assim, acredita-se que os esforços deveriam se concentrar no projeto de sensores mais baratos, ou seja, naqueles que operassem em radiofrequências, desde que apresentassem grau de acurácia aceitável em termos de engenharia. De fato, é relevante observar-se que, nos últimos 15 anos, em particular no Reino Unido e Brasil, as pesquisas visando ao desenvolvimento de medidores em linha estão voltadas para a utilização de capacitores operando em frequências de rádio (Eichler, 1985; Channa, 1985; Shaw, 1989; Berbert & Stenning, 1996; Berbert et al., 2002). Isto se deve, entre outros fatores, ao fato dos custos para o desenvolvimento e a construção de aparelhos que utilizam circuitos operando em baixa frequência, serem consideravelmente mais reduzidos que aqueles operando em frequências de microondas, tornando-os mais atraentes para o eventual utilizador.

Verificou-se, também, tanto teórica quanto experimentalmente, que é possível se obter modelos de calibração bastante precisos envolvendo parâmetros dielétricos

dos grãos e que são independentes da sua massa específica aparente. Esses modelos, obtidos usando-se capacitores operando em frequências de rádio, têm sido normalmente utilizados para monitorar o teor de água em amostras estáticas de grãos. No entanto, resultados obtidos por Berbert & Stenning (1996) revelaram que tais modelos também podem ser aplicados em situações nas quais os grãos estejam em movimento, ou seja, nas condições em que irá operar o sensor capacitivo on-line.

Berbert (1995) avaliou a aplicabilidade dos modelos dielétricos propostos por McFarlane (1987), Kraszewski & Kulinski (1976) e Lawrence & Nelson (1993) na determinação em linha do teor de água do trigo. Testou-se também o modelo obtido a partir de adaptações feitas à equação proposta originalmente por Meyer & Schilz (1980) para o cálculo do teor de água de produtos granulados e que utilizava frequências no intervalo das microondas. Visando expandir ainda mais o estudo sobre a determinação indireta do teor de água de sementes de feijão, Berbert et al. (2004) adaptaram, para o intervalo de radiofrequências as metodologias propostas por Kent & Meyer (1982), Powell et al. (1988) e Zhang & Okamura (2001). De todos os modelos avaliados, o que apresentou o melhor desempenho geral foi aquele obtido com os dois modelos que utilizam duas frequências e que foram adaptados a partir da combinação das funções de Meyer & Schilz (1980) e Kent & Meyer (1982) com o método proposto por Lawrence & Nelson (1993). Ambos os modelos apresentam desempenhos similares e resultaram em erro padrão da estimativa e erro máximo de 0,5 e 1,0 ponto percentual, respectivamente.

Para complementar esse trabalho, restava ainda avaliar a função de calibração proposta por Trabelsi et al. (2000) e sua posterior otimização (Trabelsi et al., 2001). Sendo assim, o objetivo deste trabalho consistiu em se adaptar a função do tipo  $\zeta = F \{ \epsilon'' / [\epsilon' (a_f \epsilon' - \epsilon'')] \}$ , originalmente derivada por Trabelsi et al. (2000) para a estimativa on-line do teor de água de grãos em frequências de microondas, para a determinação do teor de água de sementes de feijão, utilizando-se radiofrequências.

## 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. Todas as medições de propriedades dielétricas foram feitas utilizando-se sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade Campeão-3, colhidas com teor de água de 24,0% b.u. Todos os procedimentos experimentais estão descritos em Berbert et al. (2004).

### Adaptação do método proposto por Trabelsi & Nelson (1998)

O ponto de partida para o desenvolvimento de um modelo dielétrico que seja independente de  $\rho$  para a estimativa on-line do teor de água de produtos granulares, de acordo com o método proposto por Trabelsi & Nelson (1998), consiste na derivação de equações, para cada valor de frequência, que permitam correlacionar a massa específica aparente dos grãos e seus parâmetros dielétricos da seguinte forma:

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

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

$$\frac{\epsilon''}{\rho} = a_f \left( \frac{\epsilon'}{\rho} - k \right) \quad (2)$$

De acordo com von Hippel (1954) citado por Trabelsi & Nelson (1998), a tangente do ângulo de perdas dielétricas,  $\text{tg } \delta$ , é o parâmetro que melhor descreveria a relação entre as energias armazenada e dissipada em dielétricos. Quando grãos úmidos de determinado produto agrícola são submetidos a campos eletromagnéticos de alta frequência, o fator preponderante em relação à energia dissipada é a água presente no material. Sendo assim, um modelo dielétrico independente de  $\rho$  para o cálculo do teor de água e que seja baseado na tangente do ângulo de perdas, se constituiria na melhor solução, sob o ponto de vista energético, para descrever a interação entre as ondas eletromagnéticas e o produto granular. De fato, para sementes de trigo a 24°C e frequência de oscilação de 14,2 GHz, Trabelsi & Nelson (1998) verificaram que a relação entre  $\text{tg } \delta$  e o teor de água era representada por uma função linear positiva. No entanto, observou-se também que era graficamente visível o efeito da massa específica aparente sobre o valor de  $\text{tg } \delta$ , para cada valor de teor de água. Para reduzir este efeito, definiu-se um modelo dielétrico  $\Psi$  representado pela razão entre  $\text{tg } \delta$  e o valor de  $\rho$  dado pela Eq. 1 e representado pela seguinte equação:

$$\Psi = \frac{k a_f}{a_f \epsilon' - \epsilon''} \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right) \quad (3)$$

Observa-se que  $\Psi$  é definida apenas em função de parâmetros dielétricos do material, da constante  $k$  e de um fator,  $a_f$ , que depende da frequência utilizada na medição, sendo independente do teor de água, da temperatura e da massa específica aparente. Do ponto de vista da engenharia de desenvolvimento de protótipos de medidores, quanto menor o número de fatores extrínsecos envolvidos na equação de calibração, mais fácil será o processo de calibração do equipamento de medição. A Eq. 3 indica que para dado material e determinada frequência, o produto  $k a_f$  também é uma constante e pode ser omitido do modelo. Sendo assim e de acordo com Trabelsi & Nelson (1998), a função  $\Psi$  pode ser simplificada da seguinte maneira, quando for utilizada para calibrar um sistema de medição operando em uma única frequência. Verifica-se que, em sua forma simplificada, a função

$\zeta$  necessita de apenas um único parâmetro extrínseco para ser utilizada, ou seja, o fator  $a_f$ .

$$\zeta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'(a_f \epsilon' - \epsilon'')} \quad (4)$$

Para correlacionar o teor de água à função  $\zeta$ , basta utilizar-se a análise de regressão linear para se obter uma equação do tipo apresentado a seguir, em que  $\alpha$  representa a declividade da reta e  $\beta$  o ponto em que a reta intercepta o eixo das ordenadas.

$$\zeta = \alpha U + \beta \quad (5)$$

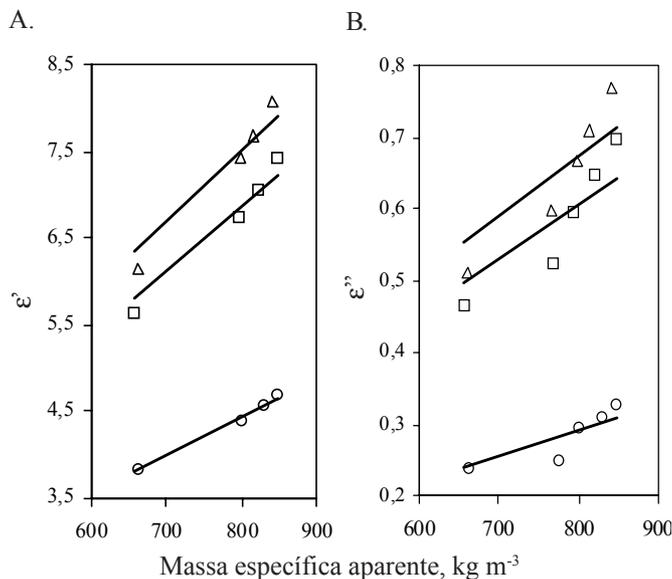
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se, nas Figuras 1A e B, as variações de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ , respectivamente, em função da massa específica aparente de sementes de feijão, para teores de água de 11,5, 15,5 e 17,7% b.u., a 1 MHz,  $20 \pm 1$  C e  $66 \pm 2\%$  de umidade relativa. Observa-se, na Figura 1A, que para cada valor de teor de água a permissividade elétrica relativa aumenta linearmente em função da massa específica aparente. As retas de mínimos quadrados que se ajustaram ao conjunto de valores, tiveram coeficientes de determinação de 0,99, 0,96 e 0,94, respectivamente. Na análise de regressão, além dos valores obtidos experimentalmente, também foram utilizados os valores teóricos correspondentes ao ponto cujas coordenadas cartesianas são (0,1), ou seja, para  $\rho = 0$ ,  $\epsilon' = 1$ . Quanto à variação do fator de perda dielétrica em função da massa específica aparente (Figura 1B), constata-se que o valor de  $\epsilon''$  também aumenta à medida que se aumenta o valor de  $\rho$ , porém as retas de mínimos quadrados tiveram coeficientes de determinação inferiores aos obtidos para a

variação de  $\epsilon'$ , ou seja, 0,76, 0,77 e 0,79, respectivamente. Na análise de regressão para obtenção da função  $\epsilon'' = F(\rho)$  além dos valores medidos também foram utilizados os valores teóricos correspondentes ao ponto cujas coordenadas cartesianas são (0,0), ou seja, para  $\rho = 0$ ,  $\epsilon'' = 0$ .

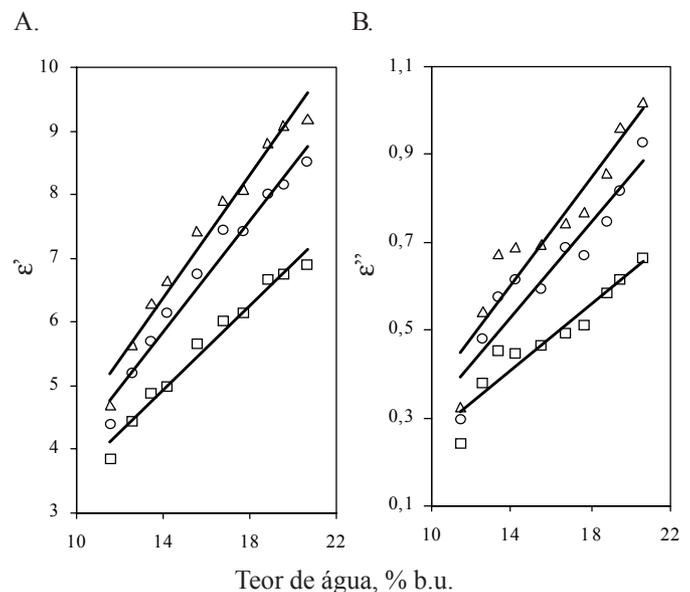
Na análise das taxas de variação dos parâmetros dielétricos em função da massa específica aparente, apresentadas nas Figuras 1A e B, ressalta-se que os valores medidos de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  se referem a uma mistura de ar e sementes de feijão, sendo que as sementes podem ser consideradas uma mistura de água e matéria seca. Para um sensor de volume conhecido e se alterando a massa específica, alteram-se também as proporções relativas de ar e feijão. Assim, para um mesmo valor de teor de água (% b.u.), ocorre também uma alteração na quantidade de água (kg) que interage com as ondas eletromagnéticas. No entanto, se forem consideradas as sementes individualmente, suas propriedades dielétricas serão constantes e terão o mesmo valor, desde que o teor de água da amostra seja homogêneo (Trabelsi & Nelson., 1998).

As variações de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  a 1 MHz em função do teor de água de sementes de feijão, para valores de massa específica de  $659 \pm 4$ ,  $800 \pm 5$  e  $844 \pm 7$  kg m<sup>-3</sup>, são mostradas nas Figuras 2A e B, respectivamente. Verifica-se que tanto os valores de  $\epsilon'$  quanto os de  $\epsilon''$  aumentam linearmente com o aumento do teor de água. As retas de mínimos quadrados que se ajustaram ao conjunto de valores ( $U$ ,  $\epsilon'$ ) tiveram coeficientes de correlação de 0,97 para todos os valores de massa específica, cujo resultado indica que apenas 3% da variação da permissividade elétrica relativa não podem ser explicados pela variação no teor de água das sementes de feijão. As equações das retas que representam a variação de  $\epsilon''$  em função do teor de água, tiveram coeficientes de determinação de 0,90. Verifica-se, novamente, que a permissividade elétrica relativa das sementes de feijão é um indicador mais confiável do teor de água das amostras, para as condições estudadas, que o fator de perda dielétrica.



○, 11,5% b.u.; □, 15,5% b.u.; Δ, 17,7% b.u.

Figura 1. Variação de  $\epsilon'_{1\text{MHz}}$  (A) e  $\epsilon''$  (B) em função da massa específica aparente, para sementes de feijão, variedade Campeão-3, para diferentes valores de teor de água a  $20 \pm 1$  C e  $66 \pm 2\%$  de umidade relativa.



□, 659 kg m<sup>-3</sup>; ○, 800 kg m<sup>-3</sup>; Δ, 844 kg m<sup>-3</sup>

Figura 2. Variação de  $\epsilon'_{1\text{MHz}}$  (A) e  $\epsilon''$  (B) em função do teor de água de sementes de feijão, variedade Campeão-3, para diferentes valores de massa específica aparente a  $20 \pm 1$  C e  $66 \pm 2\%$  de umidade relativa.

Como a permissividade elétrica relativa da água  $\epsilon'$  ( $H_2O$ )  $\cong$  80 (Kraus & Carver, 1973; Kaatz, 1996) é muito maior que a da matéria seca, cujo componente real é de aproximadamente 2 e o imaginário é, em geral, extremamente pequeno, constata-se que os valores medidos de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  apresentam variações significativas em função da variação no teor de água do produto. Para sementes com massa específica de  $800 \pm 5 \text{ kg m}^{-3}$  e para frequência de 1 MHz, uma variação de 9 pontos percentuais no valor de  $U$  resulta em aumentos da ordem de 83 e 124 % nos valores de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ , respectivamente, para temperatura de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Trabelsi & Nelson. (1998) verificaram que, para o trigo, uma alteração de 8 pontos percentuais no teor de água, para frequência de 14,2 GHz e temperatura de  $24^\circ\text{C}$ , provoca variação de apenas 8% no valor de  $\epsilon'$  e de  $\cong 140\%$  no valor de  $\epsilon''$ . Essas diferenças evidenciam como a escolha do intervalo de frequência, seja em radiofrequências ou em microondas, pode alterar a sensibilidade e, conseqüentemente, o grau de erros experimentais envolvidos na construção de um protótipo de medidor do teor de água de produtos agrícolas granulares.

Observando-se as Figuras 1A a 2B, é possível verificar que os valores de  $\rho$  e  $U$  influenciam de maneira semelhante os valores medidos e calculados de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ . Desta maneira, quando o teor de água é a variável independente a ser estimada, verifica-se que alterações no valor de  $\rho$  terão efeitos deletérios, causando erros significativos e incontroláveis no valor medido de  $U$ . Naturalmente, esses erros poderiam ser reduzidos utilizando-se um atenuador de raios- $\gamma$  para estimar de forma independente os valores da massa específica aparente, ou desenvolvendo modelos dielétricos que sejam dependentes exclusivamente do teor de água. Em termos práticos e nas condições atuais, a medição independente de  $\rho$  resultará em aumento considerável no preço do medidor de teor de água, além de trazer complicações consideráveis de ordem técnica na concepção e instalação do sistema de medição. Esta é a principal razão para que o desenvolvimento de modelos dielétricos independentes de  $\rho$  seja considerado a melhor alternativa para a estimativa on-line do teor de água de produtos agrícolas granulares.

O *locus*, no plano complexo, da permissividade complexa relativa,  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ , das sementes de feijão, é mostrado na Figura 3 para valores de teor de água no intervalo 11,5% b.u.  $\leq U \leq 20,6\%$  b.u., massa específica aparente no intervalo  $651 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho \leq 854 \text{ kg m}^{-3}$ , 1 MHz,  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e  $66 \pm 2\%$  de umidade relativa.

Nota-se não ser substancial o grau de espalhamento dos pontos ( $\epsilon''$ ,  $\epsilon'$ ) no plano complexo; no entanto, Trabelsi & Nelson. (1998) observaram um grau de espalhamento considerável desses pontos no plano complexo para sementes de trigo a 14,2 GHz. De qualquer forma, a natureza da dependência dos componentes real e imaginário da permissividade complexa relativa em relação à massa específica aparente (Figuras 1A e B) sugere que, dividindo-se tanto  $\epsilon'$  quanto  $\epsilon''$  por  $\rho$ , deveria reduzir o efeito da massa específica aparente na estimativa on-line do teor de água das sementes. De fato, ao proceder desta forma, Trabelsi et al. & Nelson. (1998) verificaram que os pontos [ $(\epsilon''/\rho)$ ,  $(\epsilon'/\rho)$ ] passaram a se concentrar ao longo de uma linha reta no plano complexo mas, como se pode observar na Figura 3B, o mesmo procedimento

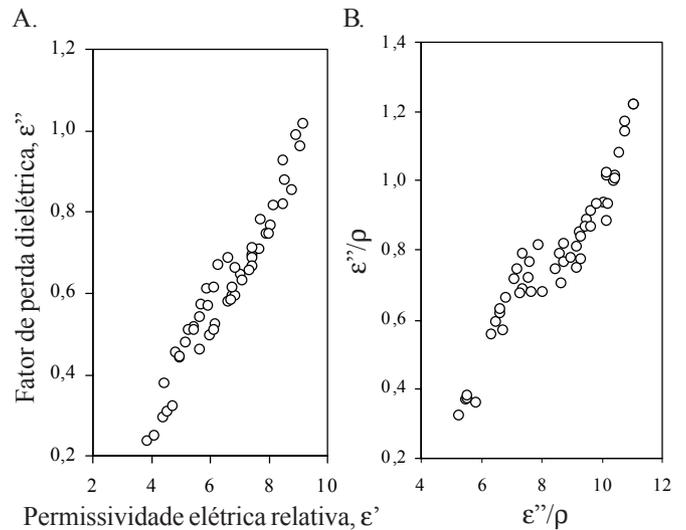


Figura 3. (A) *Locus* no plano complexo da permissividade complexa relativa,  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ , e (B) da permissividade complexa relativa dividida pela massa específica aparente de amostras de sementes de feijão, variedade Campeão-3, para valores de teor de água no intervalo 11,5% b.u.  $\leq U \leq 20,6\%$  b.u., massa específica aparente no intervalo  $651 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho \leq 854 \text{ kg m}^{-3}$ , 1 MHz,  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e  $66 \pm 2\%$  de umidade relativa

não resultou em comportamento semelhante para sementes de feijão para as condições avaliadas neste trabalho. Na realidade, ocorreu uma dispersão dos pontos ao longo da reta.

Trabelsi & Nelson. (1998) afirmam, de maneira incorreta, que Kraszewski et al. (1977) foram os primeiros pesquisadores a propor o desenvolvimento de funções independentes da massa específica aparente para a estimativa on-line do teor de água de materiais granulados, mas Berbert & Stenning (1999) demonstram que Dzhemella & Pustynnikov (1965) foram os primeiros a desenvolver um protótipo de medidor do teor de água de grãos, que se baseava na medição simultânea, em duas frequências da capacitância de um capacitor de cilindros coaxiais, tendo o produto como material dielétrico. O efeito da massa específica do produto sobre a leitura fornecida pelo equipamento foi eliminado por meio da solução de um conjunto de equações lineares em que a capacitância dependia apenas do teor de água.

Todavia, o conceito de modelo dielétrico apresentado por Kraszewski et al. (1977), apesar de empírico, baseia-se na medição de propriedades dielétricas fundamentais da matéria e não em parâmetros elétricos, como a capacitância do circuito contendo a amostra, como foi proposto por Dzhemella & Pustynnikov (1965). Como já afirmado, o modelo a ser desenvolvido neste trabalho é uma adaptação da função proposta originalmente para o intervalo de microondas, por Trabelsi & Nelson. (1998) e que incorpora conceitos introduzidos por Kraszewski et al. (1977).

Para adaptar a função  $\zeta$  proposta por Trabelsi & Nelson (1998) há que se determinar, antes de tudo, o valor da constante  $a_f$  na Eq. 2, tendo em vista que para cada valor de frequência há um conjunto de pontos [ $(\epsilon''/\rho)$ ,  $(\epsilon'/\rho)$ ] correspondente a diferentes valores de teor de água e massa específica aparente.

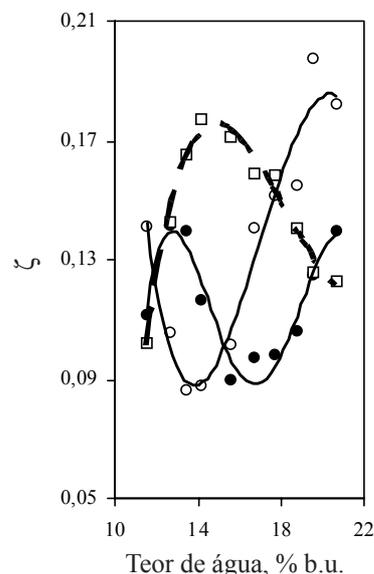
Apresentam-se, na Tabela 1, os valores de  $a_f$ ,  $k$  e os coeficientes de determinação  $r^2$ , obtidos por análise de regressão linear para diversos valores de frequência.

Observa-se que a declividade  $a_f$  da reta que representa a variação de  $(\epsilon''/\rho)$  em função de  $(\epsilon'/\rho)$ , Eq.2, diminui com o aumento da frequência até 3 MHz e, também, que o valor da constante  $k$  decresce com o aumento da frequência de 75 kHz para 3 MHz e começa a aumentar quando a frequência passa de 3 para 5 MHz. Esses resultados diferem daqueles obtidos por Trabelsi & Nelson (1998) em frequências de microondas para amostras de trigo, em que se verificou um aumento do valor de  $k$  em função do aumento da frequência; além disso, obteve-se um valor praticamente constante,  $k = 2,76$ , para todas as frequências estudadas. Teoricamente, o conjunto de retas representadas pela Eq. 2, para diferentes valores de frequência, deveria ter interceptado o eixo das abscissas em um mesmo ponto, como mostra o resultado obtido por Trabelsi & Nelson (1998) em que, para  $(\epsilon''/\rho) = 0$ , obteve-se o ponto com as seguintes coordenadas no plano complexo  $(2,76; 0)$ . Este ponto, comum às diversas retas, representaria as propriedades dielétricas de uma mistura de ar e sementes totalmente secas.

O fato dos resultados obtidos no presente trabalho serem discrepantes daqueles relatados originalmente por Trabelsi & Nelson. (1998) deve ser analisado com cautela. O trigo e o feijão diferem significativamente em termos de propriedades físicas e dielétricas, além dos intervalos de frequência estudados terem sido diferentes. Berbert (1995) e Berbert et al. (2002) mostraram que a variação de  $\epsilon''$  em função da frequência de oscilação do campo é muito mais irregular para o feijão que para o trigo. Em todo caso, os resultados apresentados na Tabela 1 parecem indicar a existência de dois intervalos de frequência em que se poderia considerar constante o valor de  $k$ ; de 75 a 100 kHz, a declividade das retas é praticamente a mesma e o valor médio de  $k$  é igual a 4,96. Para frequências de 1 a 3 MHz o valor médio de  $k$  é igual a 1,92.

Além disso, antes de se proceder à derivação do modelo dielétrico é necessário verificar se qualquer uma das funções cujos coeficientes estão apresentados na Tabela 1, é unívoca para todo intervalo de teor de água avaliado, ou seja, a cada valor de teor de água deve corresponder um único valor de  $\zeta$ . Sendo assim, apresentam-se, na Figura 4, a variação da função de Trabelsi & Nelson (1998),  $\zeta = \epsilon''/[\epsilon'(a_f \epsilon' - \epsilon'')]$ , em função do teor de água, para amostras de feijão da variedade Campeão-3, e os valores indicados de frequência, a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e  $66 \pm 2\%$  de umidade relativa.

Vê-se que a função  $\zeta$  não é unívoca para nenhum dos valores de frequência estudados e que não há como dividir o intervalo de teor de água de forma a utilizar eficientemente dois valores



○, 75 kHz; ●, 500 kHz; □, 5 MHz

Figura 4. Variação da função de Trabelsi,  $\zeta = \epsilon''/[\epsilon'(a_f \epsilon' - \epsilon'')]$ , em função do teor de água, para amostras de feijão da variedade Campeão-3 a diferentes valores de frequência, a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e  $66 \pm 2\%$  de umidade relativa.

de frequência simultaneamente, como feito por Berbert et al. (2004) para as funções propostas por Powell et al (1988) e Zhang & Okamura (2001). Desta forma, optou-se por avaliar a função  $\zeta$  a 75 kHz para teores de umidade no intervalo  $13,4\% \text{ b.u.} \leq U \leq 19,5\% \text{ b.u.}$ , pois para as condições estudadas este é o maior intervalo que se pode avaliar com as combinações possíveis de intervalo de umidade e frequência de oscilação.

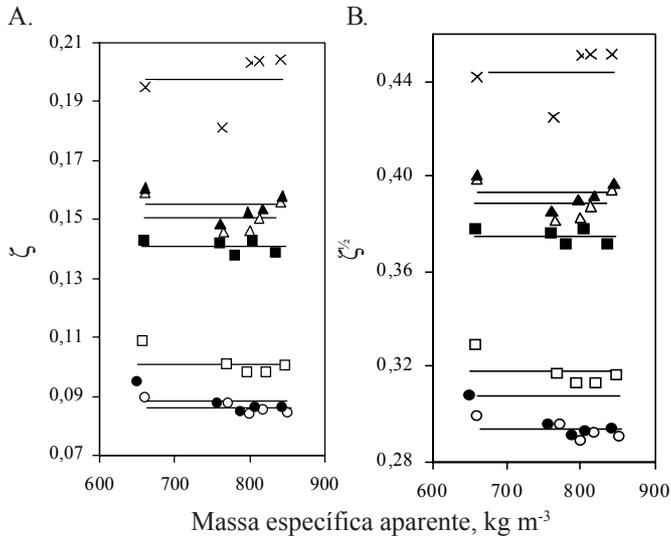
A variação de  $\zeta$  em função da massa específica aparente de sementes de feijão para frequência de 75 kHz e amostras com teor de água entre 13,4 e 19,5% b.u., é mostrada na Figura 5A. Mesmo se havendo constatado a univocidade da função  $\zeta$  quando correlacionada com o teor de água, a função não apresenta sensibilidade para alterações no valor de  $U$  de 13,4 para 14,2% b.u. e de 17,7 para 18,8% b.u. Trabelsi & Nelson (1998) observaram que a função  $\zeta^{1/2}$  apresenta maior grau de independência em relação à massa específica aparente que a função inalterada  $\zeta$ . No presente trabalho, além de não se ter observado comportamento semelhante, verificou-se que a função  $\zeta^{1/2}$  é menos sensível a variações no teor de água que a função inalterada  $\zeta$  (Figura 5B).

O método da regressão linear foi utilizado para estabelecer uma relação funcional do tipo representado pela Eq.(5), obtendo-se o seguinte modelo dielétrico para a estimativa do teor de água das sementes de feijão com  $r^2 = 0,9114$ :

$$U = 52,6355 \zeta + 9,6262 \quad (6)$$

Tabela 1. Declividade  $a_f$ , constante  $k$  e coeficiente de determinação  $r^2$  da Eq.( 2), determinados por regressão linear dos pontos localizados nos planos complexos de coordenadas  $[(\epsilon''/\rho), (\epsilon'/\rho)]$  para oito valores selecionados de frequência

	Frequência, MHz							
	0,075	0,090	0,1	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0
$a_f$	0,213	0,212	0,211	0,167	0,144	0,122	0,125	0,140
$k$	5,004	4,966	4,920	3,792	2,997	2,005	1,831	2,226
$r^2$	0,946	0,939	0,936	0,898	0,891	0,899	0,909	0,922



○, 13,4%; ●, 14,2%; □, 15,5%; ■, 16,7%; △, 17,7%; ▲, 18,8%; ×, 19,5%

Figura 5. (A) Variação, a 75 kHz, da função de Trabelsi  $\zeta = \varepsilon'' / [\varepsilon'(a_f \varepsilon' - \varepsilon'')] e (B) da função  $\zeta^{1/2}$ , em função da massa específica aparente, para amostras de feijão da variedade Campeão-3 a diferentes valores de teor de água (% b.u.), a  $20 \pm 1^\circ C$  e  $66 \pm 2\%$  de umidade relativa$

A utilização da Eq. (6) no cálculo do teor de água do feijão no intervalo  $13,4 \% \text{ b.u.} \leq U \leq 19,5 \% \text{ b.u.}$ , resulta em erro padrão da estimativa e erro máximo de 0,6 e 1,4 pontos percentuais de umidade, respectivamente. Portanto, observa-se que a adaptação para o intervalo de radiofrequências do modelo dielétrico derivado da função  $\zeta$  não apresenta resultados superiores àqueles obtidos por Berbert et al. (2004), em que a combinação da função  $[(\varepsilon' - 1)/\varepsilon''] / [(2\sqrt{\varepsilon'}) / (1 + \sqrt{\varepsilon'})]$  com o  $\ln(\varepsilon'')$ , permitiu estimar-se o teor de água do feijão com erro padrão da estimativa e erro máximo de 0,5 e 1,0 ponto percentual. A Eq. (6) foi então utilizada para se estimar o teor de água de amostras de feijão e os resultados são mostrados na Figura 6, na qual se vê o gráfico de correspondência entre os valores exper-

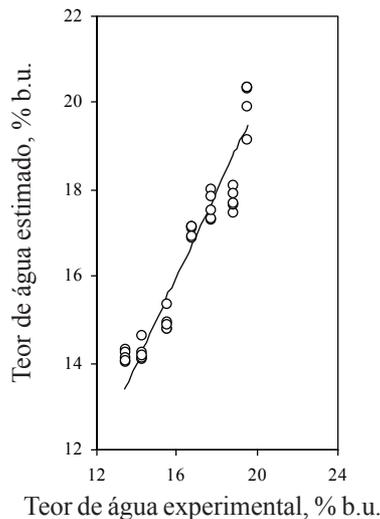


Figura 6. Gráfico de correspondência entre os valores de teores de água determinados pelo método padrão de estufa e aqueles estimados pelas Eq. (6) para amostras de feijão da variedade Campeão-3

rimentais e estimados de teor de água. Nesta figura, a linha contínua representa a correspondência ideal entre os dois valores.

## CONCLUSÕES

1. A função  $\zeta = F\{\varepsilon'' / [\varepsilon'(a_f \varepsilon' - \varepsilon'')]\}$  é praticamente independente da massa específica aparente de sementes de feijão, para radiofrequências no intervalo entre 75 kHz e 5 MHz; no entanto, não é unívoca para nenhum dos valores de frequência estudados no intervalo  $11,5\% \text{ b.u.} \leq U \leq 20,6\% \text{ b.u.}$

2. Ao se reduzir o intervalo de teor de água para  $13,4 \% \text{ b.u.} \leq U \leq 19,5 \% \text{ b.u.}$ , é possível utilizar-se a função  $\zeta$  para estimar o valor de U com erro padrão da estimativa e erro máximo de 0,6 e 1,4 pontos percentuais, 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. Doutoral Thesis.
- Berbert, P.A.; Queiroz, D.M.; Melo, E.C. Dielectric properties of common bean. Biosystems Engineering, Silsoe, v.83, n.4, p.449-462, 2002.
- Berbert, P.A.; Queiroz, D.M.; Sousa, E.F.; Molina, M.B.; Melo, E.C.; Faroni, L.R.D. Dielectric properties of parchment coffee. Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, v.80, n.1, p.65-80, 2001.
- Berbert, P.A.; Queiroz, D.M.; Sousa, E.F.; Viana, A.P.; Detmann, E.; Carlesso, V.O. Avaliação de três modelos dielétricos derivados da função  $[(\varepsilon' - 1)/\varepsilon'']$  na estimativa do teor de água de sementes de feijão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.8, n.1, p.92-101 2004.
- Berbert, P.A.; Stenning, B.C. On-Line moisture content measurement of wheat. Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, v.65, p.287-296, 1996.
- Berbert, P.A.; Stenning, B.C. Redução da influência da massa específica na determinação do teor de umidade de sementes de trigo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.34, n.4, p.641-650, 1999.
- Channa, K.S. On-line measurement of moisture content of grain in a combine harvester. Silsoe: Cranfield Institute of Technology, 1985. 95p. MPhil Thesis.
- Dzhemella, V.V.; Pustynnikov, V.G. Two-parameter instrument for automatic measurement of moisture content in corn. Instrument Construction, v.7, p.32-34, 1965.
- Eichler, I. On line measurement of grain moisture content on combine harvesters. Silsoe: Cranfield Institute of Technology, 1985. 115p. Masters Dissertation.
- Kaatze, U. Microwave dielectric properties of water. In: Kraszewski, A. (ed.). Microwave aquametry. New York: IEEE Press, 1996. p.37-53.
- Kent, M.; Meyer, W. A density-independent microwave moisture meter for heterogeneous foodstuffs. Journal of Food Engineering, Chicago, v.1, p.31-42, 1982.

- Kraszewski, A.W.; Kulinski, S. An improved microwave method of moisture content measurement and control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, v.23, n.4, p.364-370, 1976.
- Kraszewski, A.W.; Kulinski, S.; Stosio, Z. A preliminary study on microwave monitoring of moisture content in wheat. *Journal of Microwave Power*, Edmonton, v.12, n.3, p.241-252, 1977.
- Kraus, J.D.; Carver, K.R. *Electromagnetics*. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha Ltd, 1973. 828p.
- Kress-Rogers, E.; Kent, M. Microwave measurement of powder moisture and density. *Journal of Food Engineering*, Chicago, v.6, p.345-376, 1987.
- Kupfer, K.; Hübner, C. *Proceedings of the Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances*, 4, Weimar: MFPA an der Bauhaus Universität, 2001. 535p.
- 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.1823-1830, 1980.
- Okabe, T.; Huang, M.T.; Okamura, S. A new method for the measurement of grain moisture content by the use of microwaves. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Silsoe, v.8, p.59-66, 1973.
- 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.
- Shaw, S.M.B. The development of a commercial system for the on-line measurement of moisture content in high temperature continuous cereal driers, Silsoe: Cranfield Institute of Technology, 1989. Masters Dissertation.
- Trabelsi, S.; Kraszewski, A.W.; Nelson, S.O. Dielectric calibration methods for industrial microwave moisture sensors. In: *World Congress on Microwave and Radio Frequency Processing*, 2. 2000, Orlando. *Proceedings*. 2000. p. 42-50.
- 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.
- 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.