

# AUTOMAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO

## DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE SEMENTES DE TRIGO POR MEIO DA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DE DOIS PARÂMETROS DIELÉTRICOS EM UMA ÚNICA FREQUÊNCIA<sup>1</sup>

Pedro Amorim Berbert<sup>2</sup> e Brian C. Stenning<sup>3</sup>

### RESUMO

Em trabalhos anteriores, os autores avaliaram diversas metodologias que tinham como princípio básico a medição de parâmetros dielétricos para estimar a quantidade relativa de água presente em amostras de produtos granulares e que foram adaptadas para o cálculo do teor de umidade de sementes de trigo. Avaliou-se tanto a medição simultânea de um ( $\epsilon'$ ) ou dois ( $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ ) parâmetros dielétricos em duas frequências de oscilação, quanto a medição desses dois parâmetros em uma única frequência. Estas são as duas únicas alternativas, além da utilização da técnica de atenuação de raios- $\gamma$  atualmente conhecidas para eliminar ou reduzir a influência da massa específica aparente no valor calculado do teor de umidade, pré-requisito indispensável no desenvolvimento de um medidor *on-line* do teor de umidade de produtos agrícolas; no entanto, as equações de calibração então obtidas não permitiram estimar-se o teor de umidade, independentemente da massa específica aparente do produto, com os graus de exatidão e precisão desejados. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo expandir o estudo sobre a determinação indireta do teor de umidade de sementes de trigo adaptando, para o intervalo de radiofrequências, a metodologia originalmente proposta por Meyer & Schilz (1980) para o cálculo do teor de umidade de produtos granulados e que utilizava frequências no intervalo das microondas. A equação obtida permite calcular-se o teor de umidade do trigo com erros-padrão de calibração e de predição de 0,3 e 0,4 ponto percentual, respectivamente.

**Palavras-chave:** instrumentação, radiofrequência, teor de umidade

### DETERMINATION OF WHEAT MOISTURE CONTENT BY SIMULTANEOUS MEASUREMENT OF TWO DIELECTRIC PARAMETERS AT A SINGLE FREQUENCY

### ABSTRACT

In previous studies the authors have investigated several methods, which relied on the measurement of the dielectric parameters, to estimate the amount of water in samples of granular materials, and adapted these methods to calculate the moisture content of wheat seeds. These studies have been developed by simultaneously measuring one ( $\epsilon'$ ) or two ( $\epsilon'$  and  $\epsilon''$ ) dielectric parameters at two frequencies or the measurement of those two parameters at a single frequency. However, the resulting

<sup>1</sup> Apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), da International Foundation for Science (IFS) e da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

<sup>2</sup> Doutor/FAPEMIG, Ph.D. em Pré-Processamento de Produtos Agrícolas, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, CEP 36571-000, Viçosa, MG. Fone (031)899-1919. E-mail: pberbert@mail.ufv.br

<sup>3</sup> Professor, B.Sc., CIAGrE., Cranfield University, Silsoe College, Postharvest Technology Department, MK45 4DT, Silsoe, Bedfordshire, UK. E-mail: stbcs@silsoe.cranfield.ac.uk

calibration equations did not allow a density-independent estimation of moisture content to be made with the expected degree of accuracy. These are the only alternatives that could be used, besides the use of a costly  $\gamma$ -ray density gauge, in order to reduce or eliminate the deleterious effect of bulk density on the calculated value of moisture content. The density-independent determination of moisture content is a fundamental pre-requisite for the development of on-line moisture meters. Thus, the objective of this research was to investigate in more detail the factors involved in the indirect estimation of wheat moisture content by adapting to radio frequencies the method originally developed by Meyer & Schilz (1980) to measure moisture content of granular materials using microwave frequencies. The resulting equation was capable of estimating wheat moisture content with standard errors of calibration and prediction of 0.3 and 0.4-percentage point moisture, respectively.

**Key words:** instrumentation, radiofrequency, moisture content

## INTRODUÇÃO

Um dos pré-requisitos básicos para a operação eficiente de uma unidade de pré-processamento de produtos agrícolas, consiste na adoção de métodos rápidos e acurados para determinação do teor de umidade de grãos e sementes, em todas as operações em que este procedimento seja relevante, como recepção, secagem e expedição dos produtos. Um desses métodos de medição indireta do teor de umidade, adotado amplamente em unidades de pré-processamento de grãos, consiste na medição da capacitância de um elemento sensor contendo amostras do produto úmido. Neste caso, a única maneira de se evitar ou diminuir o efeito provocado pela variação da massa específica durante os procedimentos de medição, é a utilização de amostras de massa constante no espaço eletricamente ativo do medidor, mas os medidores elétricos atualmente disponíveis no mercado e que utilizam a medição da capacitância de seu elemento sensor para estimar o teor de umidade do produto, só permitem a utilização de amostras estáticas de grãos. Portanto, são inadequados no desenvolvimento de medidores *on-line* do teor de umidade de uma coluna de grãos em movimento.

Um grau maior ou menor de compactação dos grãos ao fluírem entre os eletrodos de um medidor *on-line*, pode ter efeito significativo no valor medido de teor de umidade. Stenning & Berbert (1993) verificaram que para uma única amostra de trigo da variedade Estica com teor de umidade de 14% b.u., variações da massa específica aparente entre 712 e 820 kg.m<sup>-3</sup> provocaram alterações de 13 a 16% no valor da sua permissividade elétrica relativa. Dependendo do método de medição adotado, essas variações poderiam provocar erros de magnitude correspondentes na medição do teor de umidade dos grãos.

Kraszewski & Kulinski (1976) propuseram a medição simultânea de dois parâmetros dielétricos a 9,4 GHz como procedimento capaz de eliminar o efeito da massa específica aparente na determinação indireta do teor de umidade de produtos granulares. A homogeneidade da amostra e a linearidade da relação entre os parâmetros dielétricos, a massa específica aparente e o teor de umidade, foram considerados os pressupostos básicos no desenvolvimento do método. O sistema de equações lineares obtido era então utilizado, juntamente com a equação que define o teor de umidade em decimal base úmida, para eliminar a interferência da massa específica aparente na determinação do valor daquela propriedade. Berbert & Stenning (1998) adaptaram este método para o intervalo de radiofrequências para se estimar o teor de umidade de sementes

de trigo e obtiveram erros-padrão de calibração e predição de 0,5 e 0,7 ponto percentual de umidade, respectivamente.

Meyer & Schilz (1980) também desenvolveram uma metodologia para se estimar o teor de umidade de produtos granulares, independentemente da massa específica aparente da amostra, a partir da medição de parâmetros dielétricos em uma única frequência, no intervalo conhecido como microondas. Os resultados obtidos com amostras de trigo, cevada e milho, permitiram verificar que o valor da função  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  dependia apenas do teor de umidade do produto, não sofrendo interferência de sua massa específica aparente. Nesta função,  $\epsilon'$  representa a permissividade elétrica relativa e  $\epsilon''$  o fator de perda dielétrica do produto. Verificou-se que a função era unívoca, ou seja, cada valor obtido de  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  correspondia a um único valor de teor de umidade e este comportamento era válido apenas para frequências superiores a 10 GHz. Para frequências entre 1 e 100 MHz, a função apresentava o mesmo valor para diferentes valores de teor de umidade.

Sendo assim e para dar prosseguimento às investigações anteriores, que buscavam a identificação de metodologias adequadas à determinação *on-line* do teor de umidade de produtos agrícolas, o presente trabalho teve como objetivo expandir os conhecimentos já adquiridos ao se adaptar, para o intervalo de radiofrequências, a metodologia originalmente proposta por Meyer & Schilz (1980) para o intervalo de microondas, para a determinação do teor de umidade de sementes de trigo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Pré-Processamento de Grãos do Departamento de Tecnologia Pós-Colheita, Universidade de Cranfield, Condado de Bedford, Reino Unido. Todas as medições de propriedades dielétricas foram feitas utilizando-se sementes certificadas de trigo (*Triticum aestivum* L.), variedades Hereward, Hussar e Mercia. As metodologias empregadas na construção do elemento sensor (capacitor de cilindros concêntricos) no preparo das amostras e na medição das propriedades dielétricas do trigo, encontram-se descritas em Berbert (1995).

### Adaptação para o intervalo de radiofrequências, do método originalmente proposto para frequências de microondas, por Meyer & Schilz (1980)

O método desenvolvido por Meyer & Schilz (1980) baseia-se, também, na medição simultânea de dois parâmetros

dielétricos em uma única frequência de oscilação do campo eletromagnético, para determinar o teor de umidade de produtos sólidos granulados porém, ao contrário do método proposto por Kraszewski & Kulinski (1976) utiliza procedimentos mais aprimorados para reduzir o efeito da massa específica aparente no resultado obtido. O método de Meyer e Schilz foi desenvolvido a partir da análise dos efeitos da interação de ondas eletromagnéticas com amostras de materiais sólidos granulados contendo água. Esta interação foi descrita utilizando-se a equação que define a permissividade complexa relativa, ou seja,  $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ .

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

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

Valores obtidos experimentalmente por Meyer & Schilz (1980) utilizando produtos como tabaco, café solúvel, ração para peixes, grãos de trigo e de cevada, revelaram que a relação dos parâmetros dielétricos complexos com a massa específica aparente e o teor de umidade poderia ser representada por duas funções independentes, desde que se usasse o valor de  $(\epsilon' - 1)$  ao invés do valor inalterado de  $\epsilon'$ . Desta forma, tem-se:

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

e

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

Caso as funções envolvendo a massa específica aparente,  $F_2$  e  $F_4$ , sejam lineares, a razão entre elas é uma constante e seria razoável supor-se que o valor dado por  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  seria uma quantidade independente da massa específica aparente, ou seja,

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

Se as considerações feitas no desenvolvimento da Eq.4 estiverem corretas, a função  $F_5(U)$  e, conseqüentemente, a razão  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  é uma propriedade específica do material. Esta propriedade depende unicamente do teor de umidade, da temperatura e da frequência do campo elétrico, sendo independente da massa específica aparente da amostra.

De acordo com Kress-Rogers & Kent (1987) o fundamento teórico do método proposto por Meyer & Schilz (1980) pode ser compreendido por meio da análise do plano complexo que representa o material dielétrico. Apresenta-se, na Figura 1, a representação idealizada do plano complexo  $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$  para dado material e determinado valor de teor de umidade e temperatura. Kent (1977) ao estudar as propriedades dielétricas de materiais pulverulentos verificou que, neste plano, o lugar geométrico da permissividade elétrica,  $\epsilon'$ , em função da massa

específica aparente,  $\rho$ , era representado por uma reta que passava 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). Observa-se, na mesma Figura, que o ângulo  $\theta$  independe da variação de  $\rho$ ; conseqüentemente, o valor de  $\tan \theta$  também independe da massa específica aparente do produto; no entanto, como  $\tan \theta = [\epsilon'' / (\epsilon' - 1)]$ , a razão  $[\epsilon'' / (\epsilon' - 1)]$ , ou o seu recíproco, também são funções que independem da massa específica da amostra, para determinado valor de teor de umidade e temperatura. Nesta figura são mostrados, também, os ângulos de perda dielétrica,  $\delta$ , para três pontos do plano complexo.

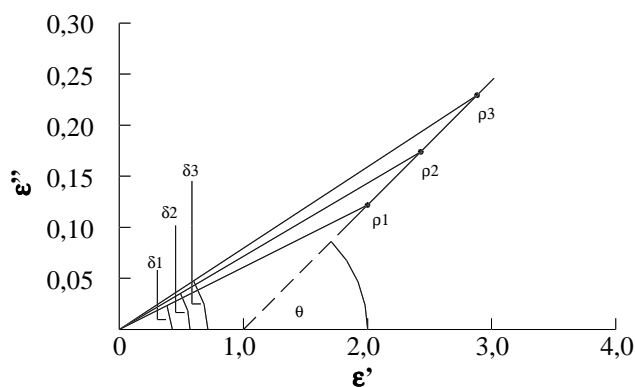


Figura 1. Diagrama de um plano complexo idealizado mostrando a variação da permissividade de determinado material dielétrico,  $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ , em função da massa específica aparente,  $\rho$ , para valores constantes de teor de umidade, temperatura e frequência (Kent & Meyer, 1982; Kress-Rogers & Kent, 1987)

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao contrário da afirmação feita por Meyer & Schilz (1980) de que a univocidade da função  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon''] = F(U)$  só ocorreria para valores de frequência superiores a 10 GHz, os resultados obtidos no presente trabalho permitiram verificar que a função é unívoca para valores consideravelmente inferiores de frequência. A análise dos resultados experimentais obtidos com as três variedades de trigo revelou que a função é unívoca para frequências entre 500 kHz e 1 MHz, deixando de sê-lo para frequências entre 2 e 5 MHz. Apresenta-se, na Figura 2, a relação entre  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  e o teor de umidade para amostras de trigo da variedade Mercia, para quatro valores de frequência. Para as frequências de 500 kHz e 5 MHz, além dos pontos experimentais mostram-se, também, as curvas obtidas por meio de análise de regressão. Verifica-se, nessa figura, que os valores de  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  a 2 e 5 MHz aumentam continuamente com a redução do teor de umidade de 22% para aproximadamente 14% b.u. A partir deste valor, a taxa de aumento diminui gradualmente até que as curvas se tornam assintóticas com a redução progressiva do teor de umidade até cerca de 11% b.u.; porém, para frequências de 500 kHz e 1 MHz, os valores de  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  não se tornam constantes para baixos teores de umidade, evidenciando que a função apresenta valores únicos no intervalo entre 11 e 22% b.u.

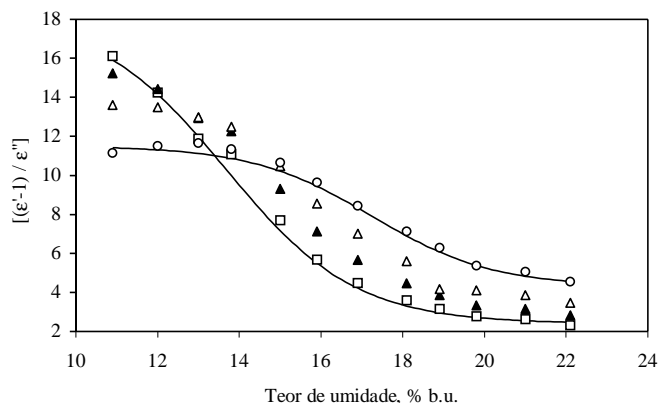


Figura 2. Variação da função de Meyer e Schilz  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  em função do teor de umidade, para amostras de trigo da variedade Mercia e valores indicados de frequência, a 21-24°C. □, 0,5 MHz; ○, 1,0 MHz; △, 2,0 MHz; ●, 5,0 MHz

Na Figura 3 é possível observar-se que o valor de  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$ , a 1 MHz, é praticamente independente da massa específica aparente do produto. Comportamentos semelhantes foram verificados para as variedades Hereward e Hussar, mas as retas obtidas por análise de regressão indicam que, apesar de a função de Meyer e Schilz ser praticamente independente da massa específica aparente em todo o intervalo de teor de umidade estudado, sua sensibilidade a variações de umidade é consideravelmente reduzida para valores elevados de teor de umidade (21 a 22% b.u.). Assim como foi observado por Lawrence & Nelson (1993), as declividades das retas apresentadas na Figura 3, à exceção daquela referente ao teor de umidade de 22% b.u., têm sempre valores negativos e próximo de zero.

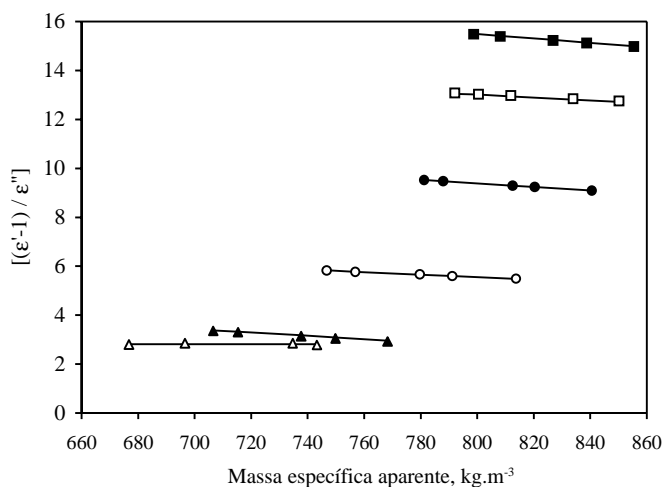


Figura 3. Valores da função de Meyer e Schilz  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  em função da massa específica aparente para amostras de trigo da variedade Mercia e valores indicados de teor de umidade, a 21-24°C e 1 MHz. ■, 10,9%; □, 13,0%; ●, 15,0%; ○, 16,9%; △, 22,1%

Ao contrário do que se esperava, os valores da função  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$ , a 1 MHz e 24°C, obtidos por Lawrence & Nelson (1993) para sementes de trigo, diferem totalmente daqueles obtidos no presente trabalho; enquanto os valores relatados por esses autores variaram no intervalo entre 10 e 118, os resultados deste trabalho variaram entre 2,5 e 15,5, para os mesmos

intervalos de teor de umidade e massa específica aparente, porém os valores aqui obtidos são semelhantes aos resultados experimentais observados por Sokhansanj & Nelson (1988); por exemplo, esses autores verificaram que a 1 MHz e 10,4% b.u., o valor da função de Meyer & Schilz para sementes de trigo aumentou de 11,0 para 12,3 com o aumento da massa específica aparente de 740 para 845  $\text{kg m}^{-3}$ . Para teor de umidade de 18,2% b.u., os valores aumentaram de 2,6 para 2,8, devido ao aumento da massa específica, de 700 para 816  $\text{kg m}^{-3}$ . Esses resultados sugerem um possível erro de cálculo por parte de Lawrence & Nelson (1993) na obtenção dos valores de  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$ .

Análises de regressão não-linear utilizando valores relativos às variedades escolhidas para calibração, Mercia e Hereward, para teores de umidade entre 11 e 22% b.u. e 1 MHz, resultaram na equação apresentada a seguir e que relaciona o teor de umidade aos parâmetros dielétricos do trigo, de forma similar àquela proposta por Meyer & Schilz (1980). A frequência de 1 MHz foi escolhida em detrimento às demais, devido ao fato de a função  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  haver-se mostrado mais sensível às variações do teor de umidade para este valor de frequência.

$$U = 1,537 \ln(\zeta) + 14,608 \quad (5)$$

em que  $\zeta$  equivale a

$$\zeta = \frac{13,436}{\left(\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''}\right)_{1,0\text{MHz}} - 2,857} - 1 \quad (6)$$

Utilizaram-se, então, as Eqs.5 e 6 para estimar o teor de umidade a partir dos valores calculados da permissividade relativa ( $\epsilon'$ ) e do fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) de amostras de trigo. A limitação desta equação é o fato de poder ser utilizada apenas para valores da função de Meyer e Schilz, no intervalo  $2,857 < [(\epsilon' - 1) / \epsilon''] < 16,293$ ; esta limitação reduz sua aplicabilidade ao intervalo de teor de umidade  $11\% \leq U \leq 19\%$  b.u. Para teores de umidade entre 21 e 22% b.u., os valores da função de Meyer & Schilz variaram no intervalo  $2,520 \leq [(\epsilon' - 1) / \epsilon''] \leq 3,378$ . Analisando-se a Eq.6, observa-se que valores de  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  fora do intervalo entre 2,857 e 16,293 resultam em valores negativos para  $\zeta$ , o que impede sua utilização para se estimar o teor de umidade. Embora os valores experimentais da função de Meyer & Schilz a 1 MHz, mostrados na Figura 2, permitam verificar que esta função é unívoca para o intervalo de teor de umidade estudado, observa-se que a curva que melhor representa a variação de  $[(\epsilon' - 1) / \epsilon'']$  em função do teor de umidade, aproxima-se de uma assíntota quando o teor de umidade aumenta de 20 para 22% b.u.

As Eqs.5 e 6 foram então utilizadas para se estimar o teor de umidade de amostras de trigo das variedades Mercia e Hereward e os resultados são mostrados na Figura 4, na qual se vê o gráfico de correspondência entre os valores experimentais e estimados de teor de umidade. Nesta figura, a linha contínua representa a correspondência ideal entre os dois valores. O erro-padrão de calibração (EPC) foi de 0,3 ponto percentual e os erros médio e máximo foram de 0,06 e 0,7 ponto percentual, respectivamente. O erro ou desvio-padrão de calibração é uma indicação do grau de distanciamento dos valores de teor de umidade determinados pelo método padrão de estufa em relação aos valores estimados pela equação de calibração, e é calculado da seguinte maneira:

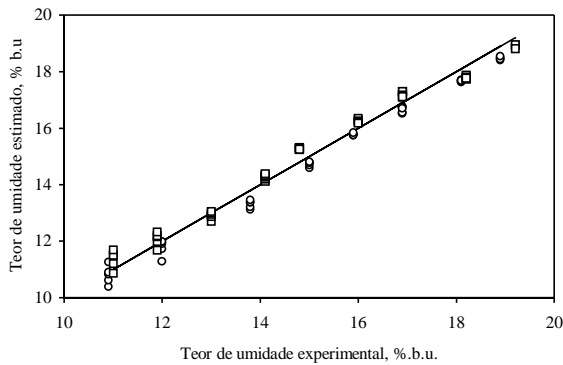


Figura 4. Relação entre os valores de teores de umidade determinados pelo método padrão de estufa e aqueles estimados pela Eq.5 para amostras de trigo das variedades Mercia (O) e Hereward (□)

$$EPC = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n e_i^2\right)}{(n-p-1)}} \quad (7)$$

em que  $e_i$  representa a diferença entre os teores de umidade 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 & Kraft, 1989; Lawrence & Nelson, 1993).

A seguir, utilizou-se a equação de calibração (Eq.5) para se calcular o teor de umidade de amostras de trigo da variedade escolhida para verificação, Hussar, e os resultados são apresentados na Figura 5, na qual se vê o gráfico de correspondência entre valores experimentais e estimados de teor de umidade. Os erros-padrão de predição (EPP) e erro médio foram de 0,4 ponto percentual, ao passo que o erro máximo foi de 1,2 pontos percentuais; o erro-padrão de predição representa o desvio-padrão das diferenças entre os valores de teor de umidade determinados em estufa e aqueles estimados pela equação de calibração, utilizando-se os dados da variedade de verificação (Hussar) e é calculado empregando-se a seguinte equação, em que  $\bar{e}$  representa o valor médio dessas diferenças.

$$EPP = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2\right)}{(n-1)}} \quad (8)$$

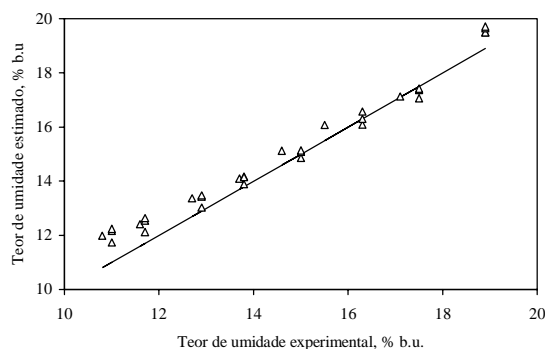


Figura 5. Relação entre os valores de teores de umidade determinados pelo método padrão de estufa e aqueles estimados pela Eq. 5, para amostras de trigo da variedade de verificação Hussar

Embora o valor do erro máximo de predição (1,2 pontos percentuais) tenha sido ligeiramente superior ao valor máximo considerado aceitável para fins de engenharia (1,0 ponto percentual), a magnitude dos erros-padrão de calibração e predição (0,3 e 0,4 ponto percentual, respectivamente) evidenciam que o método proposto por Meyer & Schilz (1980) foi aquele que proporcionou os melhores resultados, em termos de exatidão, no cálculo indireto do teor de umidade do trigo, usando-se parâmetros dielétricos. Observa-se que a equação obtida (Eq.5) fornece resultados praticamente independentes da massa específica aparente do produto.

Berbert & Stenning (1998) estudando o método proposto por Kraszewski & Kulinski (1976) para a eliminação da influência da massa específica aparente na determinação do teor de umidade de sementes de trigo, obtiveram valores de 0,5 e 0,7 ponto percentual para os erros-padrão de calibração e predição, respectivamente; os erros máximos de calibração e predição foram de 1,2 e 1,8 pontos percentuais, respectivamente; portanto, verifica-se que a adaptação do método de Meyer e Schilz para o intervalo de radiofrequências resulta em valores estimados de teor de umidade sensivelmente melhores que aqueles obtidos pelo método de Kraszewski e Kulinski, mas este último método apresenta a vantagem de poder ser aplicado no intervalo de teor de umidade entre 13 e 22% b.u., enquanto a aplicação do método de Meyer e Schilz restringe-se ao intervalo  $11\% \leq U \leq 19\%$  b.u. É importante ressaltar que a utilização de ambos os métodos resultou em erros-padrão de calibração da mesma ordem de grandeza relacionada à determinação do teor de umidade por meio de métodos padrão de estufa, que é de cerca de 0,3 ponto percentual (Kraszewski et al., 1977).

## CONCLUSÕES

1. O método de Meyer e Schilz, a 1 MHz, permite a obtenção de um modelo para o cálculo do teor de umidade do trigo, praticamente independente da massa específica aparente dos grãos.
2. Os erros-padrão de calibração e predição, 0,3 e 0,4 ponto percentual, são ligeiramente inferiores aos valores obtidos utilizando-se o método de Kraszewski e Kulinski, 0,4 e 0,5 ponto percentual, respectivamente, para as mesmas amostras de trigo e condições experimentais semelhantes.
3. O método originalmente desenvolvido por Meyer & Schilz (1980) para frequências de microondas pode ser utilizado para valores de frequência consideravelmente menores (radiofrequências) e, ainda assim, proporcionar resultados aceitáveis para fins de engenharia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERBERT, P.A. **On-line density-independent moisture content measurement of hard winter wheat using the capacitance method**. Silsoe: Cranfield University, 1995. 227p. Ph.D. Thesis

- BERBERT, P.A.; STENNING, B.C. Utilização de propriedades dielétricas na determinação do teor de umidade do trigo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, 1998, no prelo.
- JARRET, J.; KRAFT, A. **Statistical analysis for decision making**. Boston: Allyn and Bacon, 1989. 712p.
- KENT, M. Complex permittivity of fish meal: a general discussion of temperature, density and moisture dependence. **Journal of Microwave Power**, Edmonton, v.12, p.341-5, 1977.
- KENT, M.; MEYER, W. A density-independent microwave moisture meter for heterogeneous foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, Barking, v.1, p.31-42, 1982.
- 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.364-70, 1976.
- KRASZEWSKI, A.; 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.241-52, 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**, Barking, v.6, p.345-76, 1987.
- LAWRENCE, K.C.; NELSON, S.O. Radio-frequency density-independent moisture determination in wheat. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.36, n.2, p.477-83, 1993.
- MEYER, W.; SCHILZ, W. A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids. **Journal of Physics D: Applied Physics**, The Institute of Physics, Great Britain, v.13, p.1823-30, 1980.
- SOKHANSANJ, S.; NELSON, S.O. Dependence of dielectric properties of whole-grain wheat on bulk density. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.39, p.173-9, 1988.
- STENNING, B.C.; BERBERT, P.A. On line moisture content measurement. **Aspects of Applied Biology**, Cambridge, v.36, p.443-56, 1993.