

**PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DE SEMENTES DE MAMÃO**

**KARINA DE JESUS SOARES**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
MARÇO – 2014**

# PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DE SEMENTES DE MAMÃO

**KARINA DE JESUS SOARES**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Pedro Amorim Berbert

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
MARÇO – 2014

# PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DE SEMENTES DE MAMÃO

## KARINA DE JESUS SOARES

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Aprovado em 14 de março de 2014

Comissão Examinadora

---

Prof. Eros Estevão de Moura D.S., Produção Vegetal – IFES

---

Dra. Marcia Terezinha Ramos de Oliveira D.S., Produção Vegetal,  
(Pós-doutoranda UENF/CCTA/LEAG)

---

Prof. Ricardo Ferreira Garcia D.S., Engenharia Agrícola – UENF

---

Prof. Pedro Amorim Berbert PhD, Engenharia Agrícola – UENF  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

A FAPERJ, pela concessão da bolsa de mestrado;

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias – CCTA e ao Laboratório de Engenharia Agrícola – LEAG, pela oportunidade de realização deste projeto.

Ao meu orientador, professor Pedro Amorim Berbert, pela oportunidade, pela confiança e por todos os ensinamentos, além do grande incentivo;

Ao meu orientador de “Iniciação Científica”, professor Elias Fernandes de Sousa, por acreditar no meu potencial e aguçar em mim o interesse pela ciência;

À Dr<sup>a</sup> Marcia Terezinha Ramos de Oliveira por todo o suporte e incentivo;

Ao Prof. Eros Estevão de Moura pelo desenvolvimento do *software* que permitiu a coleta automática dos dados empregando o medidor LCR de precisão e pelo incentivo durante a realização do projeto;

A empresa Caliman Agrícola S/A pelo fornecimento dos frutos e ao Pedro Henrique Dias que os trouxe para o laboratório e foi um grande colaborador para a realização deste trabalho;

Às funcionárias da Coordenação de Pós-graduação em Produção Vegetal, Maria de Fátima dos Santos Sampaio e Patrícia Laurindo, pela atenção;

Aos meus familiares, em especial aos meus pais Manoel José Garcias Soares e Mariléia Souza de Jesus Soares, responsáveis diretos por minha

existência e minha educação, e aos meus irmãos Camila de Jesus Soares, Douglas de Jesus Soares e Victória de Jesus Soares, pelo afetuoso convívio;

Ao meu namorado Ezil Souza Cipriano, pelo amor, carinho e companheirismo;

Aos colegas e professores do LEAG (Prof. Ricardo Garcia, Prof. José Carlos Mendonça, Prof. Paulo Marcelo, Junior e Renata Regina) pelo afetuoso convívio e pelos ensinamentos;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS	ix
LISTA DE ÍNDICES	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. A cultura do mamão	5
2.2. Características das sementes de mamão	9
2.3. O princípio capacitivo: conceitos e definições	10
2.3.1. Teor de água	10
2.3.2. Condutância	11
2.3.3. Capacitores e capacitância	12
2.3.4. Propriedades dielétricas	14
2.4. Fatores que afetam as propriedades dielétricas de grãos e sementes	17
2.4.1. Frequência	17
2.4.2. Teor de água	17
2.4.3. Temperatura	18
2.4.4. Composição do material	19

2.4.5	Massa específica aparente	19
2.5	Propriedades dielétricas de produtos agrícolas	20
3.	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1.	Obtenção dos frutos e sementes	23
3.2.	Extração, limpeza e secagem das sementes	24
3.3	Determinação das propriedades dielétricas $\epsilon'$ e $\epsilon''$	25
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1.	Massa específica aparente	27
4.2.	Parâmetros dielétricos dos três genótipos de mamão	28
4.2.1.	Permissividade elétrica relativa ( $\epsilon'$ ) e fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) em função da frequência (f)	28
4.2.2.	Permissividade elétrica relativa ( $\epsilon'$ ) e fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) em função do teor de água (u)	33
4.2.3.	Permissividade elétrica relativa ( $\epsilon'$ ) e fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) em função da massa específica aparente ( $\rho$ )	36
4.2.4.	Permissividade elétrica relativa ( $\epsilon'$ ) e fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) em função do genótipo de mamão	41
5	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Composição, por 100 g, da parte comestível de mamão, de acordo com o grupo heterótico (Formosa e Solo)



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Representação do circuito paralelo equivalente de um dielétrico (A) e o diagrama vetorial do circuito (B).
- Figura 2.** Intervalos de variação da massa específica aparente de sementes de mamão da cultivar 'Golden' (▲) e dos híbridos Tainung 01 (●) e UENF/CALIMAN 01 (■), a 23,1 °C e 58,8 ± 2 % de UR.
- Figura 3.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão da cultivar 'Golden', em função da frequência, para valores indicados de teor de água e massa específica aparente de 162±2 kg m<sup>-3</sup>, a 23±1 °C e 60±7% UR. △, 9,1%; ▲, 12,5%; □, 15,6%; ■, 16,2%; ○, 19,0%; ●, 21,9%.
- Figura 4.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão do híbrido Tainung 01, em função da frequência, para valores indicados de teor de água e massa específica aparente de 145±1 kg m<sup>-3</sup>, a 23±1 °C e 56±5% UR. △, 9,4%; ▲, 11,7%; □, 14,8%; ■, 16,4%; ○, 20,9%; ●, 23,1%.
- Figura 5.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão do híbrido UENF/CALIMAN 01, em função da frequência, para valores indicados de teor de água e massa específica aparente de 145±1 kg m<sup>-3</sup>, a 23±1 °C e 60±8% UR. ×, 6,6%; △, 9,1%; ▲, 11,6%; □, 14,7%; ■, 17,0%; ○, 18,9%; ●, 19,7%.
- Figura 6.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão da cultivar 'Golden' (164±2 kg m<sup>-3</sup>), em função do teor de água, para valores indicados

de frequência, a  $23\pm 1$  °C e  $60\pm 7\%$  U.R. ○, 0,1 MHz; ●, 0,5 MHz; □, 1 MHz; ■, 5 MHz.

- Figura 7.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão do híbrido Tainung 01 ( $145\pm 1$  kg m<sup>-3</sup>), em função do teor de água, para valores indicados de frequência, a  $23\pm 1$ °C e  $56\pm 5\%$  UR. ○, 0,1 MHz; ●, 0,5 MHz; □, 1 MHz; ■, 5 MHz.
- Figura 8.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão do híbrido UENF/CALIMAN 01 ( $145\pm 1$  kg m<sup>-3</sup>), em função do teor de água, para valores indicados de frequência, a  $23\pm 1$ °C e  $60\pm 9\%$  UR. ○, 0,1 MHz; ●, 0,5 MHz; □, 1 MHz; ■, 5 MHz.
- Figura 9.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B), a 5 MHz, para sementes de mamão da cultivar 'Golden', para valores indicados de teor de água, a  $23\pm 1$  °C e  $60\pm 7\%$  U.R. △, 9,9%; ▲, 12,5%; □; 16,2%; ■, 19,0%; ○, 21,9%.
- Figura 10.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B), a 1 MHz, para sementes de mamão do híbrido Tainung 01, para valores indicados de teor de água, a  $23\pm 1$  °C e  $56\pm 5\%$  U.R. △, 8,2%; ▲, 10,8%; □; 14,8%; ■, 20,2%; ○, 23,1%.
- Figura 11.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B), a 1 MHz, para sementes de mamão do híbrido UENF/CALIMAN 01, para valores indicados de teor de água, a  $23\pm 1$  °C e  $60\pm 9\%$  U.R. △, 6,6%; ▲, 9,1%; □; 11,6%; ■, 14,7%; ○, 17,0%; ●, 19,7%.
- Figura 12.** Efeito do tipo de híbrido/cultivar de mamão na permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B), para sementes com teor de água de 15% b.u., em ambiente com 24 °C e 61% de UR, para valores indicados de massa específica aparente. ○, UENF/CALIMAN 01 ( $144$  kg m<sup>-3</sup>); ×, 'Golden' ( $146$  kg m<sup>-3</sup>); □; Tainung 01 ( $144$  kg m<sup>-3</sup>).

## LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS

A	área, m <sup>2</sup>
C	capacitância, F
D	fator de dissipação, adimensional
F	frequência, Hz
G	condutância, S
I	corrente, A
j	operador complexo, $j = \sqrt{-1}$
l	distância entre os dois pontos em que a voltagem é medida, m
M	massa, kg
MO	Micro-ondas
Q	carga elétrica, C
R	resistência, $\Omega$
RF	Radiofrequência
S	resistividade, $\Omega$ m
U	teor de água, kg kg <sup>-1</sup>
u	teor de água, % b.u.
v	volume da amostra, m <sup>3</sup>
V	voltagem, V
X	reatância, $\Omega$
$\delta$	ângulo de perda, rad

$\epsilon$	permissividade elétrica absoluta do dielétrico, pF m <sup>-1</sup>
$\epsilon_{\infty}$	permissividade elétrica relativa a uma frequência infinita, adimensional
$\epsilon^*$	permissividade elétrica complexa relativa do dielétrico, adimensional
$\epsilon'$	permissividade elétrica relativa do dielétrico, adimensional
$\epsilon''$	fator de perda dielétrica, adimensional
$\epsilon_s$	permissividade estática ou relativa à frequência zero, adimensional
$\zeta$	concentração volumétrica de água no material, kg m <sup>-3</sup>
$\theta$	ângulo de fase, rad
$\rho$	massa específica aparente, kg m <sup>-3</sup>
$\tau$	tempo de relaxação, s
$\sigma$	condutividade elétrica, ( $\Omega$ m) <sup>-1</sup>
$\omega$	frequência angular do campo elétrico, rad s <sup>-1</sup>

## LISTA DE ÍNDICES

0	Vácuo
a	Água
am	Amostra
c	capacitor ou propriedade a ele relacionada
ef	valor efetivo
f	deformação das linhas de campo nas bordas do capacitor
m	valor medido quando o capacitor está preenchido com a semente
ms	matéria seca
p	em paralelo
R	propriedade relacionada ao resistor (resistência)

## RESUMO

SOARES, K. J. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Março de 2014. Propriedades dielétricas de sementes de mamão. Professor Orientador: Pedro Amorim Berbert.

Estudos sobre as propriedades dielétricas de sementes de cereais, oleaginosas, leguminosas e café têm sido realizados ao longo dos últimos 40 anos, usando tanto frequências de micro-ondas quanto radiofrequências. No entanto, as propriedades dielétricas de sementes de fruteiras ainda são praticamente inexistentes na literatura. Das fruteiras tropicais, a que tem maior relevância regional, em termos econômicos, é a cultura do mamão. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo o estudo das propriedades dielétricas de sementes de mamão (*Carica papaya* L.) da cultivar 'Golden' e de dois híbridos, Tainung 01 e UENF/CALIMAN 01, no intervalo entre 75 kHz e 5 MHz, para quatro níveis de massa específica aparente ( $\rho$ ) e teor de água variando no intervalo entre 6 e 23% b.u. Utilizou-se medidor LCR de precisão, modelo HP 4285A, para determinar as propriedades dielétricas das sementes, principalmente a permissividade elétrica relativa ( $\epsilon'$ ) e o fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ), relacionando-as à frequência de oscilação do campo elétrico, ao teor de água e à massa específica das sementes. Em gráfico semilog, o valor de  $\epsilon'$ , para cada um dos valores de teor de água das sementes, e para valores similares de massa

específica aparente das amostras, diminuiu de forma regular com o aumento da frequência de 75 kHz para 5 MHz. A variação de  $\epsilon''$  em função da frequência foi ligeiramente menos regular do que a observada para os valores de  $\epsilon'$ . A relação entre  $\epsilon''$  e a frequência de oscilação do campo tornou-se mais complexa para teores de água acima de 14,8% b.u para os híbridos e de 16,2% b.u. para a cultivar. Nesses casos, houve alteração brusca na curva de variação de  $\epsilon''$  para frequências próximas a 200 kHz. Para um mesmo valor de frequência, a permissividade elétrica relativa aumentou com o aumento do teor de água, sendo esse aumento mais intenso para maiores valores de teor de água e menores valores de frequência. Como esperado,  $\epsilon'$  tornou-se menos sensível à variação no teor de água quando a frequência aproximou-se de 5 MHz. A permissividade elétrica relativa e o fator de perda dielétrica praticamente independem da frequência e do teor de água para valores inferiores a 14% – 15% b.u. No entanto, a partir desses valores, há uma mudança acentuada na declividade da curva que mostra a variação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  em função do teor de água. Essa mudança foi considerada um indicativo de alteração nos mecanismos de adsorção da água no interior da semente. Observou-se que a relação entre  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  e a massa específica aparente é representada por funções lineares crescentes. No entanto as declividades das retas que representam essas funções aumentam à medida que se aumenta o valor de  $\rho$ . Esse comportamento evidencia que a influência de  $\rho$  nas propriedades dielétricas estudadas é intensificada pelo aumento do teor de água das amostras. O efeito de cultivar/híbrido sobre  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  mostrou que as sementes da cultivar 'Golden' e do híbrido Tainung 01 possuem propriedades dielétricas semelhantes no espectro de frequências estudado, diferenciando-se daquelas do híbrido UENF/CALIMAN 01, principalmente para frequências inferiores a 1 MHz. Os valores de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  das sementes desse híbrido foram consistentemente inferiores àqueles das demais sementes avaliadas nesse trabalho.

Palavras-Chave: Fator de perda dielétrica, permissividade elétrica relativa, massa específica aparente, radiofrequência, *Carica papaya*.

## ABSTRACT

SOARES, K. J. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. March, 2014. Dielectric properties of papaya seeds. Advisor: Pedro Amorim Berbert.

Investigations on the dielectric properties of seeds of cereals, oilseeds, pulses and coffee have been conducted over the last 40 years either employing radiofrequencies or microwaves. However, the dielectric properties of seeds of fruits are scarce in literature. Among tropical fruits, papaya is considered as the most relevant in regional and economical terms, mainly in the state of Espírito Santo. As such, the object of this research was to investigate the dielectric properties of seeds of papaya (*Carica papaya* L.) of the 'Golden' cultivar and of seeds of two papaya hybrids, Tainung 01 and UENF/CALIMAN 01, in the frequency range from 75 kHz to 5 MHz, at four levels of bulk density  $\rho$ , and moisture contents ranging from 6 to 23% w.b. Seed dielectric properties, mainly the relative permittivity  $\epsilon'$  and the loss factor  $\epsilon''$ , were measured using an HP 4285A precision LCR meter, and their relationship with the variables frequency of the oscillating electric field, seed moisture content and bulk density, and cultivar/hybrid type were established. In a semi-log plot, the value of the relative permittivity  $\epsilon'$ , for each value of moisture content and similar levels of bulk density, reduced regularly as frequency increased from 75 kHz to 5 MHz. Variation of loss factor  $\epsilon''$  as a function of frequency was less regular as compared to



relative permittivity  $\epsilon'$ . Relationship between  $\epsilon''$  and frequency became more complex for moisture content values above 14.8% w.b. (UENF/CALIMAN 01 and Tainung 01) and above 16.2% w.b. ('Golden'), when an abrupt change in the curve representing this relationship was noticed at 200 kHz. For a determined value of frequency the relative permittivity increased when moisture was increased, and the dispersion of permittivity values was more pronounced for higher values of moisture content at the lower range of frequency. As expected, the relative permittivity  $\epsilon'$  became less sensible to moisture content variation when frequency approached 5 MHz. Relative permittivity and loss factor were practically independent of frequency and for moisture content values in the range up to 14% – 15% w.b. However, a further increase in moisture content prompted an abrupt change in the slope of the curves showing the relationship between  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$  and moisture content. This behaviour was considered an indication of changes in the water sorption mechanisms occurring within the seed. The relationships between  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$  with bulk density  $\rho$  were represented by linear functions with positive slopes. However, the slope of these linear functions increases as bulk density increases, which was considered evidence that the influence of  $\rho$  on the dielectric properties is enhanced by moisture. The effect of cultivar or hybrid types on  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$  showed that seeds of cultivar 'Golden' and of the Tainung 01 hybrid have similar dielectric properties as opposed to seeds of the hybrid UENF/CALIMAN 01, mainly at frequencies below 1 MHz. The values of  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  for seeds of this latter hybrid were consistently lower as compared to those obtained with cultivar 'Golden' and Tainung 01 hybrid.

Keywords: Loss factor, relative permittivity, bulk density, radio frequency, *Carica papaya*.

## 1. INTRODUÇÃO

O mamoeiro (*Carica papaya* L.) é uma fruteira tipicamente tropical com provável centro de origem entre a região que compreende o sul do México e o norte da Nicarágua (Ruggiero et al., 2011). Atualmente, o mamoeiro é amplamente distribuído em várias áreas do mundo, havendo relatos de sua produção em todos os países de clima tropical e subtropical quente.

De acordo com os dados de 2012, o Brasil teve destaque como o segundo maior produtor mundial de mamão, com produção de aproximadamente 1,5 milhões de toneladas, em área plantada de 31,3 mil hectares, perdendo apenas para a Índia, que foi responsável por 5,2 milhões de toneladas em 129,1 mil hectares (FAO, 2012). Nesse mesmo ano, o volume de mamão brasileiro exportado atingiu cerca de 26,1 mil toneladas e gerou receita de aproximadamente 36,4 milhões de dólares (Agrostat, 2012).

Dentre os estados brasileiros com maiores produções destacam-se a Bahia, responsável por 45% da produção nacional (683.474 toneladas do fruto em área total plantada estimada em 11.635 hectares), seguida do Espírito Santo que produziu 484.645 toneladas de mamão em 7.075 hectares no mesmo ano (IBGE, 2012). Do total de frutos de mamão exportados, o estado do Espírito Santo respondeu por 47,6% das exportações no ano de 2012 (Agrostat, 2012).

Nos plantios comerciais brasileiros, o meio de propagação mais utilizado para o mamoeiro é o uso de sementes (Carlesso et al., 2009a). De acordo com Carvalho e Nakagawa (2012), as sementes são produtos mais nobres e caros do

que os grãos quando se considera a cadeia produtiva de alimentos, pois há que preservar sua qualidade fisiológica para reprodução das espécies ao longo do tempo. Nesse caso, sementes ortodoxas e intermediárias são geralmente armazenadas por períodos extensos de tempo com teor de água reduzido (de 5 a 8% b.u.) e sob baixas temperaturas. Moura et al. (2013) destacam a importância de medidores *on-line* do teor de água instalados no ambiente de armazenamento que funcionariam como método de controle de qualidade sem a necessidade de destruição das amostras, como é o caso do método da estufa.

Os medidores *on-line* de teor de água são classificados como métodos indiretos de determinação e são baseados na medição de determinadas propriedades físicas do material que sejam diretamente correlacionadas com o seu teor de água. Os medidores que utilizam as propriedades dielétricas como parâmetros são os mais estudados atualmente.

Segundo Trabelsi et al. (2013), para correlacionar as propriedades dielétricas ao teor de água de sementes e grãos é necessário analisar detalhadamente a variação da permissividade elétrica relativa ( $\epsilon'$ ) e do fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) em função da frequência ( $f$ ), da massa específica aparente ( $\rho$ ) e da concentração volumétrica de água ( $\zeta$ ) na amostra contida no interior do sensor capacitivo. Esse procedimento permite antever que frequências e intervalos de teor de água e massa específica aparente poderão integrar os modelos dielétricos que se deseja avaliar. Assim, para determinar o teor de água *on-line* com precisão, os efeitos da massa específica aparente e da temperatura têm que ser explicados por meio de medição e compensação adicional ou eliminados por meio da identificação de funções que sejam independentes da massa específica aparente e que sejam insensíveis a variações de temperatura Trabelsi et al. (2013).

A maioria dos pesquisadores que buscam soluções para o efeito da massa específica aparente na determinação *on-line* do teor de água de produtos agrícolas tem concentrado seus esforços no desenvolvimento de medidores operando na frequência de micro-ondas (Lisovsky, 2007; Trabelsi et al., 2009; Digman et al., 2012). No entanto, é relevante observar que o desenvolvimento de medidores *on-line* empregando capacitores operando em radiofrequências continua a atrair o interesse de pesquisadores (Berbert et al., 2007a; Funk et al., 2007). Isto se deve, entre outros fatores, ao fato de que com a escolha apropriada

do tamanho e da forma dos eletrodos, é possível medir o teor de água utilizando-se um volume considerável de grãos, resultando em leitura mais representativa. Acrescente-se a isso o fato de os 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 micro-ondas, tornando-os mais atraentes para o eventual utilizador (Brooker et al., 1992).

Para projetar um sensor capacitivo que possa integrar um medidor *on-line* do teor de água para fins agrícolas e que seja o mais abrangente possível é preciso, em primeiro lugar, determinar as propriedades dielétricas de diversos tipos de produtos. É a partir da investigação da variação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  em função do teor de água, da massa específica aparente e da frequência de oscilação do campo elétrico que se determina os intervalos ou valores dessas variáveis que irão compor o modelo dielétrico. De fato, estudos sobre as propriedades dielétricas de grãos de cereais como arroz (Prasad e Singh, 2007), cevada (Kim et al., 2003), milho (Sacilik e Colak, 2010), sorgo (Moura et al., 2013), trigo (Berbert et al., 2002a) e de sementes de oleaginosas como amendoim (Boldor et al., 2004), linhaça (Sacilik et al., 2006), soja (Trabelsi e Nelson, 2006), de leguminosas como o feijão (Berbert et al., 2007b) e de café (Berbert et al., 2008) têm sido realizados ao longo das últimas décadas, usando tanto frequência de micro-ondas quanto radiofrequências.

No entanto, as propriedades dielétricas de sementes de fruteiras ainda são praticamente inexistentes na literatura. A razão para que isso tenha acontecido deve-se, provavelmente, ao reduzido volume de produção dessas sementes em relação aos demais produtos agrícolas como grãos e sementes de cereais, oleaginosas e café. Assim, ao se projetar um sensor capacitivo que possa integrar o circuito eletrônico de um protótipo de medidor *on-line* do teor de água de produtos agrícolas granulares, deve-se prever a inclusão de novas funções dielétricas que permitam a estimativa do teor de água do maior número de produtos possível, para torná-lo cada vez mais abrangente. A inclusão de novas funções dielétricas também é útil para a calibração do medidor à medida que novas variedades ou cultivares surjam no mercado (Trabelsi e Nelson, 2006). Das fruteiras tropicais, a que tem maior relevância regional em termos econômicos é a cultura do mamão. Em 2012, o estado do Espírito Santo foi

responsável por 88% da produção de mamão no sudeste brasileiro e de 32% do total produzido no país (IBGE, 2012).

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho consistiu na determinação das propriedades dielétricas de sementes de mamão da cultivar 'Golden' e dos híbridos Tainung 01 e UENF/CALIMAN 01, para valores de teor de água no intervalo entre 6% e 23% b.u., em quatro níveis de massa específica aparente, para frequências entre 75 kHz e 5 MHz, empregando-se a coleta automática de dados por meio de *software* desenvolvido especificamente para esse fim.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. A cultura do mamão

O local de origem do mamoeiro (*Carica papaya* L.) ainda é discutido, sendo que alguns autores mencionam o sul do México, outros citam as terras baixas da América Central e as Antilhas. Lorenzi et al. (2006) consideram o centro de origem e dispersão a América tropical como um todo. O mamoeiro é uma das plantas tropicais de maior importância na produção nacional e mundial de fruteiras. Trata-se da sétima fruta *in natura* mais exportada no País (Agrostat, 2012).

O mamoeiro é uma frutífera de grande importância econômica, sendo cultivada principalmente nos países tropicais e possui ótima aceitação no mercado mundial. A produção mundial de mamão em 2012 foi de cerca de 12,5 milhões de toneladas, sendo a Ásia (55,9%), Américas (33,3%) e África (10,7%) as principais responsáveis pela produção mundial. Atualmente, o Brasil ocupa a segunda posição mundial em volume de produção e a terceira colocação em área colhida, com 1.517.696 toneladas em 2012, o que representa participação de 12,2% da produção mundial em área plantada de 31.310 ha (FAO, 2012).

A produção nacional do fruto está concentrada nos estados da Bahia, que é o maior produtor de mamão com 683.474 toneladas em um total de área plantada de 11.635 ha, respondendo por aproximadamente 45% da produção

brasileira de mamão, seguido do Espírito Santo, Ceará e Rio Grande do Norte (IBGE, 2012).

O mamoeiro cultivado comercialmente insere-se na classe Magnoliopsida, na subclasse Dilleniidae, na ordem Violales, na subordem Caricineae, na família Caricaceae e no gênero *Carica* (USDA, 2013). Lorenzi et al. (2006) descrevem o mamoeiro como uma árvore tipicamente tropical, lactescente, de tronco oco, não lenhoso (herbáceo), que vive por cerca de 5 a 10 anos, de 3 a 6 m de altura, ereto, podendo atingir até 8 m, cresce como árvore monocaule encimado por uma coroa de folhas. Apresenta folhas alternadas, grandes, com 20 a 60 cm de comprimento e até 70 cm de diâmetro, membranáceas e glabras, recortadas, com pecíolo também oco. O sistema radicular é pivotante, com raiz principal muito desenvolvida. As flores são brancas ou amareladas. O ovário é unilocular, o que o diferencia dos demais gêneros. Os frutos são alongados, lisos e de tamanho variável, podendo chegar a 3 kg. A polpa é carnosa, de coloração vermelho-alaranjada, com numerosas sementes pretas.

Embora possa ser propagado assexuadamente por meio de enxertia, estaquia, ou cultura de tecidos, comercialmente, o mamoeiro é propagado por meio de mudas oriundas de sementes (Santos et al., 2009). As plantas matrizes devem ser hermafroditas, provenientes de flores autopolinizadas, em plantações distantes de outras variedades, plantas com bom estado sanitário, baixa altura de inserção das primeiras flores, precocidade e alta produtividade e que gerem frutos comerciais típicos da cultivar, ou seja, frutos piriformes provenientes de flores hermafroditas (Oliveira e Trindade, 2000). O mamoeiro é considerado uma frutífera de crescimento rápido e elevada precocidade, iniciando o florescimento entre três e quatro meses, propiciando as primeiras colheitas a partir do oitavo mês (Lyra et al., 2007).

Em geral, conforme a característica do fruto, o mamoeiro é classificado em dois grupos heteróticos: Solo (frutos menores) e Formosa (frutos maiores). Em pomares domésticos ainda são encontrados mamoeiros comuns ou dióicos, com características distintas ou intermediárias entre os dois grupos heteróticos (Santos et al., 2009). Segundo Serrano e Cattaneo (2010), os municípios de Pinheiros –ES, Prado e Porto Seguro – BA são os maiores produtores de mamão do grupo Formosa (principalmente o híbrido importado Tainung 01), e Linhares e Sooretama – ES são os maiores produtores de mamão do grupo Solo

(principalmente 'Golden' para exportação e 'Sunrise Solo' para o mercado nacional).

O grupo Solo é constituído por plantas de diversos cultivares sendo explorados em várias regiões do mundo e seus frutos são conhecidos como "papaia" ou mamão havaiano, de tamanho pequeno, pesando de 0,30 a 0,65 kg, de polpa avermelhada. O genótipo 'Golden' é proveniente de seleção massal realizada em campos de produção de 'Sunrise Solo', na empresa Caliman Agrícola Ltda., no Estado do Espírito Santo. Possui fruto hermafrodita piriforme, com polpa rosa-salmão, cavidade interna estrelada, casca lisa, tamanho uniforme, peso médio de 0,45 kg e excelente aspecto visual. No estágio verde apresenta cor de casca mais clara que a variedade que lhe deu origem. Possui boa aceitação no mercado internacional, porém com teor de sólidos solúveis dos frutos e produtividade inferiores ao 'Sunrise Solo' (Pérez, 2004).

O grupo Formosa, constituído por alguns híbridos que se caracterizam pela produção de frutos de polpa avermelhada e de tamanho médio, entre 1,0 e 1,3 kg, abrange híbridos F1 e entre eles se encontram o Tainung 01 e UENF/CALIMAN 01. Tainung 01 é resultante do cruzamento de um tipo de mamão de polpa vermelha, da Costa Rica, com o 'Sunrise Solo' (Santos et al., 2009). Este híbrido é altamente produtivo e o fruto oriundo de flor feminina é redondo alongado e o da flor hermafrodita é comprido, com peso médio de 0,90 kg. Apresenta casca de coloração verde claro e cor de polpa laranja-vermelhada, de sabor muito apreciável; exala um odor forte, apresenta boa durabilidade de transporte e pouca resistência ao frio. A produtividade média está em torno de 60 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Dantas et al., 2000). O UENF/CALIMAN 01 é um híbrido obtido do cruzamento entre um progenitor do grupo Formosa e um progenitor do grupo Solo. Apresenta características fenotípicas do grupo Formosa, produzindo frutos hermafroditas alongados, com peso médio de 1,25 kg, de polpa firme e vermelha e com alto teor de sólidos solúveis, bem como sabor e aroma bastante agradáveis (Ferreguetti, 2003).

O mamão é um fruto nutritivo, que apresenta boas qualidades sensoriais sendo amplamente cultivado para o consumo *in natura* e para uso em sucos, doces e geleias. Nutricionalmente, o mamão é uma boa fonte de cálcio e beta-caroteno, vitaminas A, C e do complexo B, fonte de sais minerais como cálcio, potássio e magnésio (Tabela 1) (Santana et al., 2004; TACO, 2011).



**Tabela 1.** Composição, por 100 g, da parte comestível de mamão, de acordo com o grupo heterótico (Formosa e Solo)

COMPONENTE	QUANTIDADE	
	Mamão Formosa	Mamão Solo
Água (%)	86,9	88,6
Proteínas (g)	0,8	0,5
Lipídios (g)	0,1	0,1
Carboidratos (g)	11,6	10,4
Fibras (g)	1,8	1,0
Cinzas (g)	0,6	0,4
Cálcio (mg)	25,0	22,0
Potássio (mg)	222,0	126,0
Fósforo (mg)	11,0	11,0
Magnésio (mg)	17,0	22,0
Manganês (mg)	0,04	0,01
Ferro (mg)	0,2	0,2
Sódio (mg)	3,0	2,0
Cobre (mg)	1,36	0,02
Zinco (mg)	0,1	0,1
Valor Calórico (kcal)	45,0	40,0

**Fonte:** Tabela Brasileira de composição de alimentos (TACO, 2011).

O mamão também tem vários usos industriais, suas folhas e seus frutos produzem diversas proteínas e alcaloides com importantes aplicações farmacêuticas e industriais. Destes, no entanto, a papaína, uma enzima proteolítica particularmente importante que é produzida no látex de frutos de mamão verde, pode ser utilizada na fabricação de bebidas, alimentos e produtos farmacêuticos (gomas de mascar, amaciantes de carnes, suplemento digestivo que auxilia na digestão de proteínas e no tratamento de feridas gangrenosas como anti-inflamatório). A papaína também tem sido empregada na indústria têxtil para gomagem e amolecimento de seda e lã, na indústria de cosméticos, para fabricação de sabonetes e xampu (Batistuzzo et al., 2011).

## 2.2. Características das sementes de mamão

Comercialmente, o mamoeiro é propagado por meio de mudas oriundas de sementes. A semente apresenta-se envolvida por duas membranas, sendo uma externa, denominada arilo ou sarcotesta (envelope mucilaginoso), e a outra interna, chamada esclerotesta (camada enrugada), que envolve o tégmen. Internamente é constituída pelo endosperma e embrião, sendo este composto pelo eixo hipocótilo-radícula e pelos cotilédones (Marin et al., 1995).

Para a conservação de sementes em longo prazo, deve-se conhecer, além da sua condição inicial, as suas características de armazenamento específicas. Roberts (1973) propôs a classificação das sementes quanto às suas características de armazenamento em duas categorias: ortodoxas e recalcitrantes. Ortodoxas são aquelas que podem ter o seu teor de água reduzido pela secagem até graus de umidade muito baixos (5 a 2% ou menos) e que suportam baixas temperaturas, inclusive as temperaturas subzero empregadas na conservação em longo prazo, sem ter a sua viabilidade comprometida. As sementes que não toleram dessecação até níveis abaixo de 10%, conforme a espécie, e que não sobrevivem em temperaturas subzero receberam a denominação de “recalcitrantes”.

Carvalho e Nakagawa (2012) enumeram os fatores que afetam a manutenção da qualidade das sementes ao longo do tempo, destacando o grau de umidade, as condições do ambiente de armazenamento, principalmente a temperatura e umidade relativa do ar e o tipo de acondicionamento utilizado. Além disso, a longevidade das sementes é influenciada por outros fatores, tais como espécie, variedade e histórico do lote de sementes. Althoff e Carmona (1999) observaram que sementes de mamão toleram o dessecamento até 5% de umidade, sem perda do poder germinativo. No entanto, não são tolerantes ao armazenamento a temperaturas inferiores a 5 °C. Estes autores verificaram, ainda, que o armazenamento em embalagem permeável é apropriado para a conservação das sementes em condição ambiente de Brasília – DF. Entretanto, Santos et al. (1999) concluíram que a melhor conservação das sementes de mamão ocorreu quando foram mantidas no refrigerador (2 a 5 °C), independentemente da embalagem utilizada, quando armazenadas com 7,0% de umidade.

Segundo Carlesso (2009b), as sementes de mamão já foram citadas como sendo tolerantes à dessecação até o grau de umidade da ordem de 6,5% (Ellis et al., 1991) sem perda de viabilidade. Quanto à tolerância a baixas temperaturas, Teng e Hor (1976) constataram a perda total da viabilidade de sementes de mamão com grau de umidade de 10% após quatro meses de armazenamento à temperatura de 0 °C. Porém, Beckwar et al. (1983) relataram que sementes de mamão toleram dessecação até o mesmo grau de umidade e subsequente exposição a nitrogênio líquido (-196 °C) por 24 h. Ellis et al. (1991) concluíram que sementes com grau de umidade entre 7,9 e 9,4% submetidas a temperaturas abaixo de 15 °C tiveram sua viabilidade significativamente reduzida, sendo que quanto mais secas e resfriadas, menor seu poder germinativo.

Estas observações possibilitam afirmar que as sementes de mamão não são ortodoxas, tampouco recalcitrantes, o que as inclui em uma categoria intermediária (Ellis et al., 1991), não podendo ser conservadas em câmaras frias para armazenamento de sementes com baixo grau de umidade, em que, como para a maioria das grandes culturas, espera-se que a longevidade das sementes seja aumentada com a redução do seu teor de água e da temperatura ambiente (Carlesso, 2009b).

### 2.3. O princípio capacitivo: conceitos e definições

#### 2.3.1. Teor de água

O teor de água é definido pela Eq. (1) e como seu cálculo está sempre associado a um determinado volume do produto, Kraszewski (1988) propôs que a Eq. (1) fosse reescrita no formato da Eq. (2). O valor mais usado é o teor de água em porcentagem base úmida, dado por  $U = 100u$ .

$$u = \frac{M_a}{(M_a + M_{ms})} \quad (1)$$

$$u = \frac{\frac{M_a}{v}}{\frac{(M_a + M_{ms})}{v}} = \frac{\zeta}{\rho} \quad (2)$$

### 2.3.2. Condutância

Condutância refere-se à capacidade de um material para conduzir corrente elétrica pelo deslocamento de elétrons e íons (Schiffmann, 2006). Callister e Rethwisch (2013) destacam que uma das principais características elétricas de um material é a condução elétrica. Uma corrente elétrica resulta do movimento de partículas eletricamente carregadas em resposta a forças que atuam sobre elas a partir de um campo elétrico externamente aplicado. As partículas carregadas positivamente são aceleradas na direção do campo, enquanto as partículas carregadas negativamente são aceleradas na direção oposta. A lei de Ohm relaciona a corrente elétrica  $I$  ou taxa de passagem de cargas ao longo do tempo à voltagem aplicada  $V$  da seguinte maneira:

$$V = IR \quad (3)$$

A resistência  $R$  do material é influenciada pela configuração da amostra e para muitos materiais ela é independente da corrente. A resistividade elétrica  $S$  é independente da geometria da amostra, mas está relacionada à  $R$  pela Eq. (4)

$$S = \frac{RA}{l} \quad (4)$$

A partir da expressão para lei de Ohm e da Eq. (4), tem-se

$$S = \frac{VA}{Il} \quad (5)$$

Algumas vezes a condutividade elétrica  $\sigma$  é considerada para especificar a natureza elétrica de um material, sendo representada simplesmente pelo inverso da resistividade, ou seja,

$$\sigma = \frac{1}{S} \quad (6)$$

Portanto, a condutividade elétrica é uma propriedade indicativa da facilidade pela qual um material é capaz de conduzir corrente elétrica.

Callister e Rethwisch (2013) destacam que a condutividade elétrica de um material é uma forma de classificá-lo eficientemente em três grupos: condutores, semicondutores e isolantes. Os condutores são os materiais que apresentam tipicamente condutividade na ordem de  $10^6$  e  $10^7$   $(\Omega \text{ m})^{-1}$ , os metais são considerados bons condutores. No outro extremo estão materiais com condutividade muito baixa variando entre  $10^{-10}$  e  $10^{-20}$   $(\Omega \text{ m})^{-1}$ , sendo classificados como isolantes elétricos. Os materiais com condutividades intermediárias geralmente entre  $10^{-10}$  e  $10^6$   $(\Omega \text{ m})^{-1}$ , são denominados semicondutores.

### 2.3.3. Capacitores e capacitância

O capacitor é um dispositivo utilizado para armazenar carga elétrica e energia. O capacitor é formado de duas placas metálicas de um material condutor, denominado armadura ou eletrodo, separadas por um material isolante ou dielétrico (Saab, 2006). Quando uma voltagem é aplicada através de um capacitor, uma placa fica carregada positivamente enquanto a outra fica carregada negativamente, com o campo elétrico correspondente direcionado da carga positiva para a negativa (Callister e Rethwisch, 2013). A capacitância é a propriedade de um capacitor ou de um sistema de condutores e dielétricos que permite armazenar cargas separadas eletricamente, quando existem diferenças de potencial entre os condutores (Halliday et al., 2009), sendo representada pela Eq. (7).

$$C = \frac{Q}{V} \quad (7)$$

A capacitância de um material é influenciada por fatores como a área do eletrodo (condutor) e a espessura do dielétrico (distância entre os eletrodos). Segundo Callister e Rethwisch (2013), considerando um capacitor de placas planas paralelas, com vácuo na região entre as placas, sua capacitância pode ser calculada pela Eq. (8). O parâmetro  $\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF m}^{-1}$  é uma constante universal denominada permissividade elétrica do vácuo. Se um material dielétrico é inserido na região entre as placas do capacitor tem-se a Eq. (9), em que a permissividade  $\epsilon$  desse meio dielétrico apresenta magnitude maior que  $\epsilon_0$ .

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{l} \quad (8)$$

$$C = \epsilon \frac{A}{l} \quad (9)$$

A permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  representa a capacidade de armazenamento de cargas elétricas pela inserção de um meio dielétrico entre as placas de um capacitor (Callister e Rethwisch, 2013), sendo representada pela Eq. (10).

$$\epsilon' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (10)$$

Substituindo-se o valor de  $\epsilon = \epsilon' \epsilon_0$  na Eq. (9) tem-se:

$$C = \epsilon' \epsilon_0 \frac{A}{l} \quad (11)$$

Esta última equação mostra que a capacitância para capacitores de placas planas paralelas de área  $A$  e distância entre as placas  $l$  é aumentada pelo fator  $\epsilon'$  quando o espaço entre as placas é preenchido por um dielétrico. É relevante mencionar que as equações anteriores para o cálculo da capacitância

somente são válidas para capacitores de placas infinitas, de modo que as distorções das linhas do campo nas bordas do capacitor não existam. No entanto, estas fórmulas podem fornecer boa aproximação quando os valores de  $l$  são suficientemente pequenos em relação à área das placas, minimizando o efeito das distorções nas bordas (Moura, 2012).

#### 2.3.4. Propriedades dielétricas

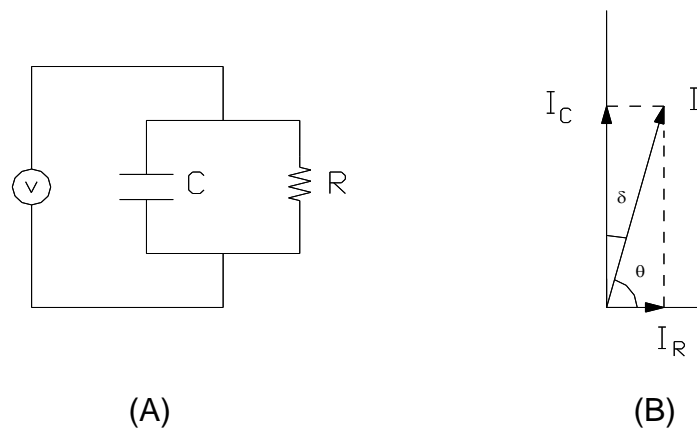
Callister e Rethwisch (2013) definem dielétricos como isolantes elétricos (não metálicos) que exibem ou podem ser produzidos de modo a exibir uma estrutura de dipolo elétrico, ou seja, no nível molecular ou atômico, há uma separação entre as cargas positivas e negativas eletricamente carregadas. São aqueles materiais nos quais os portadores de carga elétrica não encontram facilidade de movimento, sendo, portanto, considerados isolantes (Halliday et al., 2009). São exemplos de dielétricos: plástico, óleo mineral, borracha, mica e ar atmosférico. Para Young e Freedman (2009), o dielétrico é um isolante e colocar um dielétrico sólido entre as placas de um capacitor possui três objetivos: 1. Resolve o problema mecânico de manter duas grandes placas metálicas separadas por uma distância muito pequena, sem que ocorra contato entre elas; 2. Usando um dielétrico torna-se possível aumentar a diferença de potencial máxima entre as placas e, 3. A capacitância de um capacitor com dimensões fixas, quando existe um dielétrico entre as placas, é maior do que a capacitância do mesmo capacitor quando há vácuo entre elas.

As propriedades dielétricas de muitos materiais dependem da frequência e da intensidade da corrente elétrica alternada aplicada, da temperatura, do teor de água, da massa específica aparente, da composição e da estrutura do material. Estudos e aplicações dessas propriedades foram realizados em ovos, grãos, sementes, frutas, vegetais, sucos e vinhos, alimentos assados e moídos, laticínios, peixes e carnes (Lizhi et al., 2008). No entanto, Nelson (1991) destaca que em materiais higroscópicos, como a maioria dos produtos agrícolas granulares, o teor de água é geralmente o fator dominante.

O interesse nas propriedades dielétricas de materiais agrícolas e produtos alimentares tem como um dos objetivos prever a taxa de aquecimento, definindo

seu comportamento quando submetidos aos campos de alta-frequência em aplicação de aquecimento dielétrico, ou o então chamado tratamento térmico moderno. A influência das propriedades dielétricas no aquecimento de alimentos por absorção de energia por meio de radiofrequências ou frequências de micro-ondas tem sido estudada há algum tempo e tem-se explorado muitos potenciais de aplicação (Morales et al., 2010).

Sob qualquer frequência de oscilação, um material dielétrico pode ser representado por um circuito paralelo equivalente (Fig. 1A), que consiste de uma capacitância  $C$  e uma resistência  $R$  ideais (Berbert, 1995).



**Figura 1.** Representação do circuito paralelo equivalente de um dielétrico (A) e o diagrama vetorial do circuito (B). Fonte: (Berbert, 1995).

Desta forma, se o dielétrico fosse submetido a um campo eletromagnético alternado e senoidal de frequência  $f$ , o circuito se comportaria como uma reatância puramente capacitiva com um ângulo de fase  $\theta$  igual a  $\pi/2$ . No entanto, na prática, quando se submete um dielétrico a um campo de corrente alternada, parte da energia armazenada no capacitor é dissipada na forma de calor. O efeito da existência deste tipo de perda é a redução, de magnitude  $\delta$ , que ocorre no ângulo de fase  $\theta$  (Fig. 1B), em que se representa o diagrama vetorial do circuito. Outro termo relacionado à dissipação de energia no dielétrico é a tangente do ângulo  $\delta$ , também chamada de tangente do ângulo de perdas ou fator de dissipação  $D$ . O valor de  $\text{tg}\delta$  pode ser calculado a partir dos valores de



condutância  $G$  e capacitância  $C$ , utilizando-se a Eq. (12), em que  $\omega$  representa a frequência angular,  $\omega = 2\pi f$  (Berbert, 1995).

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_c} = \frac{\frac{V}{R}}{\frac{V}{X_C}} = \frac{X_C}{R} = \frac{\frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{G}{\omega C} \quad (12)$$

As outras propriedades dielétricas importantes para o cálculo indireto do teor de água de determinado produto são dadas pelas Eqs. (13) e (14) (Berbert, 1995).

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (13)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} - j \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (14)$$

A Eq. (14) pode ser expressa em sua forma simplificada (Eq. 15):

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (15)$$

O termo real da permissividade complexa relativa, Eq. (14), representa simplesmente a permissividade elétrica relativa ( $\varepsilon'$ ) do dielétrico, ao passo que o termo imaginário representa o fator de perda dielétrica do material ( $\varepsilon''$ ). A parte real está associada com a capacidade que o material tem de armazenar energia quando está sujeito a um campo elétrico, a parte imaginária refere-se à capacidade do dielétrico dissipar energia na forma de calor (Schiffmann, 2006). A parte imaginária ou dissipativa também pode ser representada pelo produto de  $\varepsilon'$  pela tangente do ângulo de perdas (Eq. 16):

$$\varepsilon'' = \frac{G}{C_0\omega} = \frac{G\varepsilon'}{C\omega} = \varepsilon' \operatorname{tg}\delta \quad (16)$$

## 2.4. Fatores que afetam as propriedades dielétricas de grãos e sementes

As propriedades dielétricas são intrínsecas do material e caracterizam a interação entre o material e um campo elétrico, sendo representada pela permissividade relativa complexa (Eq. 15), em que  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  dependem da frequência, do teor de água, da temperatura e da composição do material. Para materiais granulares elas também dependem da massa específica aparente (Trabelsi e Nelson, 2004).

### 2.4.1. Frequência

Segundo Nelson (1994), com a exceção de alguns materiais que essencialmente não absorvem energia a partir de campos na faixa de micro-ondas, as propriedades dielétricas da maioria dos materiais variam consideravelmente com a frequência dos campos elétricos aplicados. A influência da frequência nas propriedades dielétricas pode ser explicada pela polarização das moléculas que apresentam momento dipolo permanente, que tendem a mudar a sua orientação quando submetidas a um campo elétrico alternado.

De acordo com Moura (2012), é comum o uso de campo elétrico alternado para determinação do teor de água em sistemas capacitivos. Zhu et al. (2012) avaliaram a variação da permissividade elétrica relativa de sucos de maçã e de uva sob frequências de 20 a 4500 MHz. Neste trabalho observou-se que a permissividade elétrica relativa diminuiu com o aumento da frequência. Os valores diminuíram rapidamente nas frequências abaixo de 40 MHz e mudaram lentamente entre 100 e 1000 MHz.

### 2.4.2. Teor de água

O teor de água afeta as propriedades dielétricas dos materiais agrícolas devido à interação das moléculas de água com o campo elétrico (Nelson e Trabelsi, 2009). A água tem uma estrutura bipolar, isto é, enquanto as moléculas de água são neutras como um todo, uma extremidade da molécula de água tende

a ter carga positiva enquanto a outra tem uma carga negativa. Em tais moléculas um campo elétrico alternado causa oscilações que geram perdas devido à absorção e reflexão de energia, assim quanto maior o teor de água, maior será a perda (Kandala e Sundaram, 2010; Pandey et al., 2012).

Pandey et al. (2012) destacam que a água destilada tem alta permissividade elétrica relativa, de aproximadamente 80 a 20 °C, devido ao momento dipolar, ou seja, a molécula de água pode ser facilmente polarizada influenciando as propriedades dielétricas do material.

A relação entre a permissividade elétrica relativa, o fator de perda dielétrico e o teor de água foi demonstrado por McKeown et al. (2012) para a cebola sob três diferentes faixas de frequências. Os autores comprovaram que o comportamento das propriedades dielétricas estudadas foi altamente dependente do teor de água do material. Observou-se que sob altas frequências  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  aumentaram linearmente com o teor água e para um dado valor de teor de água os valores de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  diminuíram com o aumento da frequência.

De acordo com Kraszewski e Nelson (1994), a permissividade elétrica da água, em seu estado livre ou ligada à matriz de um material higroscópico, é muito diferente daquela de um material dielétrico higroscópico seco.

Guo et al. (2010) demonstraram que os valores de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  em função do teor de água, para amostras de farinhas de grão de bico, de vagem, de lentilha e de soja, aumentaram com a mudança na atividade de água.

### 2.4.3. Temperatura

Um aumento na temperatura modifica o estado energético dos dipolos da molécula de água, dando-lhes uma maior liberdade para girar com o campo elétrico. Isto resulta no aumento da polarização do meio e perdas na forma de calor (Trabelsi e Nelson, 2006).

Com o aumento da temperatura, o tempo de relaxação diminui e o pico do fator de perda se deslocará para frequências mais altas. Assim, em uma região de dispersão, a permissividade elétrica relativa aumentará com o aumento da temperatura, enquanto o fator de perda pode aumentar ou não, consoante a

frequência de funcionamento ser mais elevada ou mais baixa do que a frequência de relaxação (Nelson, 1994).

Guo et al. (2010) destacaram que a permissividade elétrica relativa e o fator de perda dielétrico de farinha de leguminosas diminuíram com o aumento da frequência especialmente sob altas temperaturas.

Jiao et al. (2011), utilizando propriedades dielétricas para avaliar a taxa de infestação de gorgulho em feijão mungo verde, observaram que a permissividade elétrica relativa aumentou com o decréscimo da faixa de frequência e o incremento de temperatura e o aumento no teor de água.

#### 2.4.4. Composição do material

A composição química do material influencia nas suas propriedades dielétricas, principalmente a presença de sais dissolvidos. Peng et al. (2013) destacaram que os níveis de sais presentes em amostras de tecidos de tomates aumentaram significativamente as suas propriedades dielétricas. Este aumento nos valores de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  pode ser explicado pelo aumento na condutividade iônica da amostra devido à concentração de sais dissolvidos.

Nelson et al. (2006) avaliaram as propriedades dielétricas de melão, sob diferentes faixas de frequências, correlacionando-as à qualidade e ao grau de maturidade dos frutos. Estes autores observaram que a medição do teor de sólidos solúveis, principalmente açúcares, é o melhor critério para avaliação de qualidade do fruto.

#### 2.4.5. Massa específica aparente

A constante dielétrica do ar é 1,0 e, para efeitos práticos, o ar é considerado um meio translúcido às ondas eletromagnéticas sob frequências alternadas. Portanto a sua inclusão em um material reduz a massa específica aparente e o mesmo ocorre com as suas propriedades dielétricas, sua permissividade elétrica relativa e seu fator de perda dielétrico (Schiffmann, 2006).

Kraszewski e Nelson (1994) afirmam que mudanças ou flutuações na massa específica aparente de uma amostra de grãos resultam em valores de propriedades dielétricas similares àqueles gerados por mudanças nos valores de teor de água, criando um erro na medição da umidade. Manter constante a massa específica aparente de uma amostra de grãos durante a determinação do teor de água em uma unidade de secagem e armazenamento é um problema de difícil solução; sendo assim, uma alternativa viável é a utilização de funções dielétricas que sejam independentes da massa específica aparente.

Sacilik et al. (2007) demonstraram que o aumento da massa específica aparente de sementes de cártamo para qualquer valor de teor de água implicou em maiores valores de permissividade elétrica relativa. A compactação da amostra causou redução na porosidade e aumento da massa específica aparente, conseqüentemente houve um acréscimo na concentração volumétrica de água.

## 2.5. Propriedades dielétricas de produtos agrícolas

Schiffmann (2006) relata que existe uma ampla gama de usos das propriedades dielétricas nas indústrias de madeira, têxteis, de alimentos, de cerâmicas, de pneus e na agricultura. Na maioria dos casos os sistemas são customizados ou aplicáveis a uma única espécie, ou seja, exibem determinados padrões/configurações em função da sua aplicação. Estes variam quanto a faixa de frequência, o tipo de eletrodo, o método empregado, a natureza física e elétrica do material a ser medido (Nelson, 1999), o grau de precisão e as variáveis dielétricas a serem determinadas.

As técnicas mais estudadas atualmente para a determinação das propriedades dielétricas dos materiais empregam radiofrequências (RF) e micro-ondas (MO) (Venkatesh e Raghavan, 2005). RF refere-se a campos eletromagnéticos com frequência entre 300 kHz e 300 MHz, enquanto MO refere-se a campos com frequências no intervalo entre 300 MHz e 300 GHz (Nelson, 1996).

Na agricultura, as propriedades dielétricas são empregadas como método indireto e não destrutivo para determinação do teor de água de grãos e sementes. De acordo com Nelson e Trabelsi (2010), o teor de água de grãos e sementes

determina o seu momento de colheita, a aptidão para o armazenamento, sendo também utilizado na comercialização desses produtos. Se o teor de água for muito alto para o armazenamento seguro, deve-se proceder a secagem para retirar a umidade em excesso e evitar a deterioração. Os custos de secagem devem ser considerados na determinação de preço para a comercialização.

De acordo com Nelson (2008), os primeiros dados quantitativos sobre as propriedades dielétricas dos grãos foram relatados para a cevada (Nelson et al., 1953), juntamente com um método para a medição confiável dessas propriedades na faixa de frequência de 1-50 MHz. Posteriormente foram obtidos resultados semelhantes para o trigo (Knipper, 1959).

Nelson e Trabelsi (2011) destacam que vários trabalhos envolvendo propriedades dielétricas foram realizados para diversas espécies de grãos e de sementes oleaginosas, tais como trigo (*Triticum aestivum* L.), milho (*Zea mays* L.), cevada (*Hordeum vulgare* L.), aveia (*Avena sativa* L.), soja (*Glycine max* L.), canola (*Brassica napus* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* L.) e amendoim (*Arachis hypogaea* L.) com temperatura média de 23 °C e diferentes intervalos de frequência de micro-ondas e de teor de água. Essas medições possibilitaram o desenvolvimento de modelos matemáticos que se adequassem a cada uma destas espécies. Neste trabalho, os autores expressaram que para todas as espécies de grãos e sementes estudadas houve uma correlação linear entre as propriedades dielétricas medidas, permissividade elétrica relativa e fator de perda, e a frequência, o teor de água e a massa específica aparente.

Nelson e Trabelsi (2010) demonstraram que há aumento da permissividade elétrica relativa do trigo com o aumento da temperatura e que este comportamento é razoavelmente linear, embora ocorra o desvio da linearidade para teores de água mais elevados e frequências mais baixas. Resultados semelhantes foram relatados para o algodão (*Gossypium hirsutum* L.) (Hemstreet, 1982) e para o café (*Coffea arabica* L.) (Berbert et. al., 2001).

Nelson (2005) cita que outra aplicação das propriedades dielétricas é a detecção do ataque inicial de insetos aos grãos armazenados. Neste trabalho, o autor utilizou a técnica da espectrometria dielétrica para determinar a permissividade dielétrica do caruncho do arroz adulto (*Sithophilus orizae* L.), em trigo, sob frequências no intervalo de 250 Hz a 12 GHz. Comprovou-se que a permissividade elétrica relativa do inseto praga foi muito maior que a

permissividade elétrica relativa do trigo sob temperatura de 24 °C e massa específica aparente de 0,49 g cm<sup>-3</sup>.

As propriedades dielétricas foram utilizadas para avaliação da qualidade e maturidade de frutas frescas como maçã (*Malus domestica* Borkh) (Guo et. al., 2007a; Guo et al., 2011), pêssego (*Prunus persica* L.) (Nelson, 2005), melão (*Cucumis melo* L.) (Guo et. al., 2007b; Nelson et. al., 2006), uva (*Vitis* sp) (Tulasidas et. al., 1995) e laranja azeda (*Citrus aurantium* subsp. Bergamia). Nestes trabalhos os autores correlacionaram as propriedades dielétricas dos tecidos interno e externo do fruto com os teores de água e de sólidos solúveis, sob diferentes frequências.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado nos anos de 2012 e de 2013, no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ.

#### 3.1. Obtenção dos frutos e sementes

Os frutos de mamoeiro (*Carica papaya* L.) da cultivar 'Golden' e dos híbridos Tainung 01 e UENF/CALIMAN 01 foram colhidos no estágio de maturação dois, em lavoura comercial da Empresa Caliman Agrícola S/A, na Fazenda Santa Terezinha, localizada na Rodovia BR 101 Norte, km 111, no município de Linhares, ES. Este estágio de maturação é caracterizado pelo fato de o fruto apresentar a casca com cerca de 15 a 25% da superfície amarelada. Depois da colheita, os frutos foram transportados para o LEAG; ao chegarem ao laboratório, foram dispostos sobre bancada, permanecendo em condição ambiente durante aproximadamente 10 dias, até atingirem o estágio de maturação cinco, ou seja, estágio em que os frutos se apresentam totalmente maduros, com mais de 75% da superfície da casca amarelada.



### 3.2. Extração, limpeza e secagem das sementes

Os frutos foram cortados longitudinalmente, tomando-se cuidado para que a faca de aço inoxidável não penetrasse a região central, evitando assim a ocorrência de danos mecânicos às sementes. Para remover as sementes do interior dos frutos, juntamente com os restos placentários, utilizou-se uma colher de aço inoxidável. As sementes foram transferidas para uma peneira de malha de aço e a limpeza foi realizada por fricção contra a malha da peneira, em água corrente, até remoção total dos restos placentários e da sarcotesta. As sementes foram expostas às condições do ambiente de laboratório por cerca de 3 h, sobre peneira de arame, até que a água superficial evaporasse. Essa pré-secagem permitiu a redução do teor de água das sementes para aproximadamente 40% b.u. Posteriormente, as sementes foram secadas a 40 °C em protótipo de secador de leito fixo, com fluxo de ar tangencial, até que o teor de água fosse reduzido a aproximadamente 23% b.u. Em seguida dividiu-se o lote de sementes em sublotes que foram acondicionados em recipientes herméticos de vidro de 700 mL e armazenados em câmara tipo BOD a 10 °C.

Para obtenção de sublotes com os valores desejados de teor de água (entre 23% e 6% b.u.), em cada experimento um dos recipientes armazenados foi removido do ambiente refrigerado e permaneceu sobre bancada até entrar em equilíbrio térmico com o ar ambiente. Posteriormente as sementes foram dispostas sobre quatro bandejas retangulares com fundo e lados perfurados, de maneira a formar uma camada delgada com altura correspondente à espessura média das sementes. Em seguida, as bandejas foram colocadas no interior do protótipo de secador, mantendo-as pelo tempo necessário para atingir o teor de água esperado. O monitoramento da secagem e, portanto, do teor de água, foi feito por gravimetria, pesando-se a bandeja a cada 5 min, utilizando-se balança digital com precisão de 0,01 g. Depois de obtido o teor de água desejado, as sementes foram novamente acondicionadas no recipiente de vidro e armazenadas a 10 °C por 10 dias, para homogeneização do teor de água.

O teor de água das sementes foi determinado obedecendo as recomendações propostas nas Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009) e empregando-se o método da estufa a alta temperatura,  $130 \pm 1$  °C por 1 h, com

quatro repetições. Para esse procedimento utilizou-se estufa para secagem e esterilização Binder, modelo FED 240.

### 3.3. Determinação das propriedades dielétricas $\epsilon'$ e $\epsilon''$

Para a medição dos parâmetros elétricos,  $C_p$  e  $G$ , das amostras utilizou-se o medidor LCR de precisão, modelo 4285A, fabricado pela Hewlett-Packard. Este equipamento é capaz de medir 12 parâmetros de impedância em frequências de teste de 75 kHz a 30 MHz. As propriedades dielétricas foram determinadas utilizando-se voltagem efetiva de 1,0  $V_{ef}$ . A configuração com quatro pares de terminais foi utilizada para conectar o capacitor de cilindros concêntricos ao medidor HP 4285A. Este tipo de conexão minimiza os problemas relacionados com a indutância mútua, as resistências de contato e os ruídos elétricos.

O sensor utilizado para conter as amostras durante as medições das propriedades dielétricas das sementes foi um capacitor de cilindros concêntricos semelhante ao descrito por Berbert et al. (2002b). O volume útil do capacitor é de  $5,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ , sendo possível conter aproximadamente 0,09 kg de sementes de mamão a 13% b.u.

Os dois parâmetros da permissividade elétrica complexa foram calculados a partir da medição da capacitância equivalente em paralelo ( $C_p$ ) e da condutância ( $G$ ) tanto do sensor vazio quanto preenchido com as sementes de mamão. Os valores de  $C_p$  e  $G$  foram medidos a 75, 80, 85, 90, 100, 200, 300, 400 e 500 kHz e a 1, 2, 3, 4 e 5 MHz. Os valores de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  foram calculados de acordo com as Eqs. 17 e 18, respectivamente, de acordo com a metodologia descrita por Moura et al. (2013). Nessas equações, os valores numéricos estão associados aos valores de capacitância introduzidos no elemento sensor pelos elementos de teflon que o constituem.

$$\epsilon' = \frac{C_m - C_f - 2.1873}{5.7896} \quad (17)$$

$$\epsilon'' = \frac{G_m - G_0}{\omega C_0} \quad (18)$$

A coleta automática de dados foi realizada por meio de computador dotado de placa com interface HP-IB e *software* de controle Labview da *National Instruments* desenvolvido por Moura (2012).

Neste trabalho, adotou-se procedimentos semelhantes aos relatados por Berbert et al. (2008) para se determinar o efeito da massa específica aparente do material granular nas suas propriedades dielétricas. Para cada teor de água, foram obtidas amostras com quatro valores de massa específica aparente.

Os valores naturais de  $\rho$  foram obtidos vertendo-se a amostra de sementes no cilindro que forma a parte superior da balança de peso hectolítrico e que estava posicionado sobre o capacitor de cilindros concêntricos. Naturalmente, para que isso fosse possível, os diâmetros das duas peças foram aproximadamente os mesmos, ou seja, 85 mm. Ao se retirar a lâmina que retém a amostra no cilindro, as sementes fluíram e se alojaram no espaço disponível do elemento sensor.

Para obtenção dos demais valores de  $\rho$ , verteu-se, inicialmente, a amostra em um cone metálico posicionado sobre o elemento sensor e cuja saída encontrava-se obstruída por tampa de borracha; logo a seguir, retirava-se a tampa de borracha permitindo que a amostra fluísse naturalmente. Em todos os casos, o material em excesso foi retirado do capacitor com uma régua, mantendo-se as sementes sempre no nível da extremidade superior dos eletrodos.

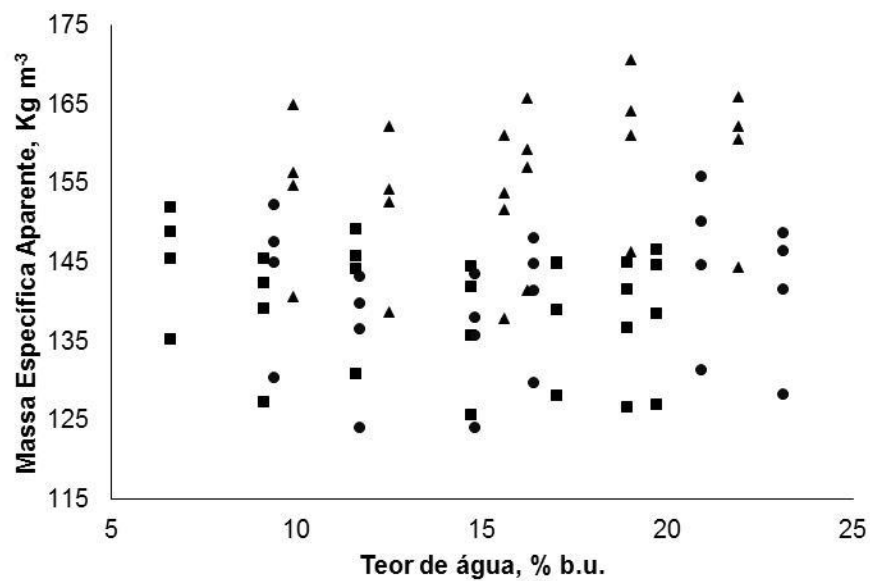
Para se conseguir os menores valores de  $\rho$ , misturou-se às sementes de mamão uma quantidade predefinida de esferas de poliestireno expandido (isopor) com diâmetro similar às sementes. A permissividade elétrica relativa do poliestireno, no intervalo entre 1 kHz e 1 GHz, é igual a 1,017, valor muito semelhante, em termos práticos, à permissividade relativa do ar,  $\epsilon'_{ar} = 1,0006$ . O poliestireno é também um material que provoca dissipação de energia extremamente reduzida da onda eletromagnética, apresentando fator de perda dielétrica  $\epsilon'' = 0,0001$  (Berbert et al., 2008).

Depois de cada repetição as sementes localizadas nas células do capacitor foram colocadas em um béquer para que sua massa fosse determinada, utilizando-se para isso balança digital ED 4202S-OCE, com precisão de 0,01 g, fabricada por Sartorius Weighing Technology GmbH. A equação  $\rho = (M_{am}/V_c)$  foi empregada para o cálculo da massa específica aparente.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Massa específica aparente

A Figura 2 mostra a variação da massa específica aparente ( $\rho$ ) das sementes de mamão da cultivar 'Golden' e dos híbridos Tainung 01 e UENF/CALIMAN 01, para valores de teor de água entre 6 e 23% b.u.



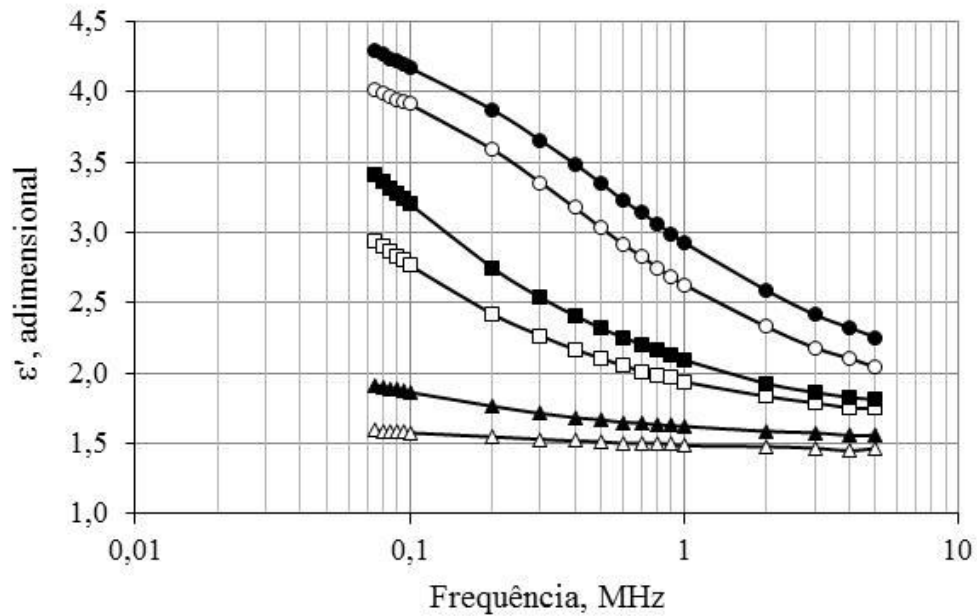
**Figura 2.** Intervalos de variação da massa específica aparente de sementes de mamão da cultivar 'Golden' (▲) e dos híbridos Tainung 01 (●) e UENF/CALIMAN 01 (■), a  $23 \pm 1$  °C e  $60 \pm 9\%$  de UR.

Observa-se, nessa figura, que os maiores valores de  $\rho$  foram obtidos com sementes da cultivar 'Golden'. A massa das amostras variou entre 0,0683 e 0,0938 kg e os valores de  $\rho$  variaram no intervalo entre 124,1 e 170,6 kg m<sup>-3</sup>. Essa variação de 37% nos valores de  $\rho$  representa os valores que deverão ser encontrados em situações práticas em que se deseja estimar o teor de água das sementes a partir de suas propriedades dielétricas. Variações na massa específica aparente da ordem de 28% foram obtidas para sementes de café em pergaminho por Berbert et al. (2001), de 23% para feijão (Berbert et al. 2002b) e de 25% para grãos de sorgo (Moura, 2012).

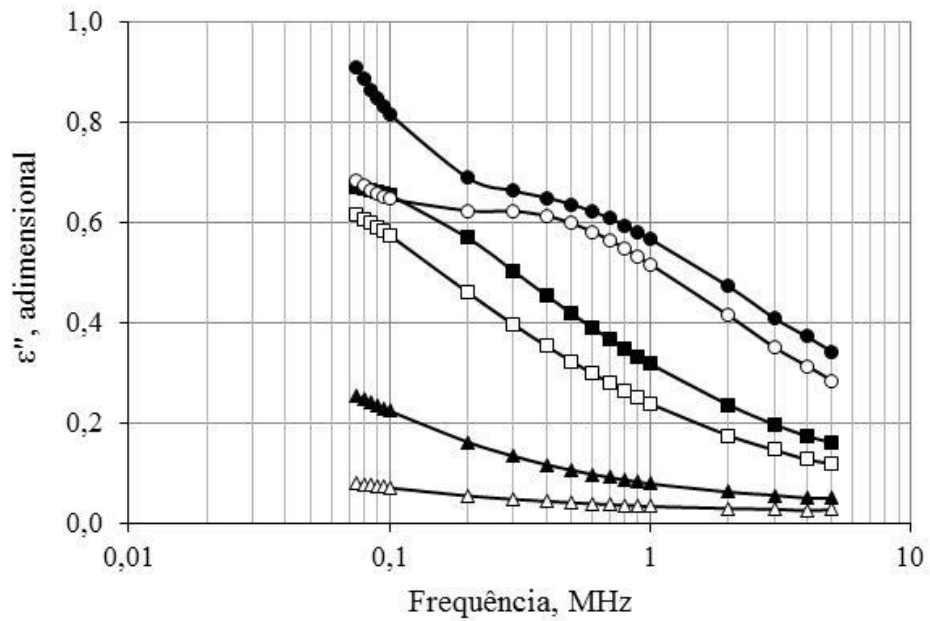
#### 4.2. Parâmetros dielétricos dos três genótipos de mamão

##### 4.2.1. Permissividade elétrica relativa ( $\epsilon'$ ) e fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) em função da frequência (f)

Apresentam-se, nas Figuras 3, 4 e 5, os valores de permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e o fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B), para frequências entre 75 kHz e 5 MHz, de sementes de mamão da cultivar 'Golden' e dos híbridos Tainung 01 e UENF/CALIMAN 01, respectivamente, para teores de água no intervalo entre 6 e 20% b.u. e para valores similares de massa específica aparente  $\rho$ . Observa-se, nessas figuras, que o padrão de variação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  em função da frequência de oscilação do campo elétrico foi semelhante para os três genótipos, ou seja, ocorreu redução de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  com o aumento da frequência de 75 kHz para 5 MHz. A variação no valor de  $\epsilon'$ , por exemplo, para sementes de mamão UENF/CALIMAN 01 com teor de água de 19,7% b.u. e massa específica aparente 144,6 kg m<sup>-3</sup>, decresce de 4,01 para 2,02 quando a frequência aumenta de 75 kHz para 5 MHz. Esses resultados foram semelhantes àqueles encontrados para o milho (Sacilik e Colak, 2010), trigo mourisco (Zhu et al., 2013) e noz macadâmia (Wang et al., 2013).

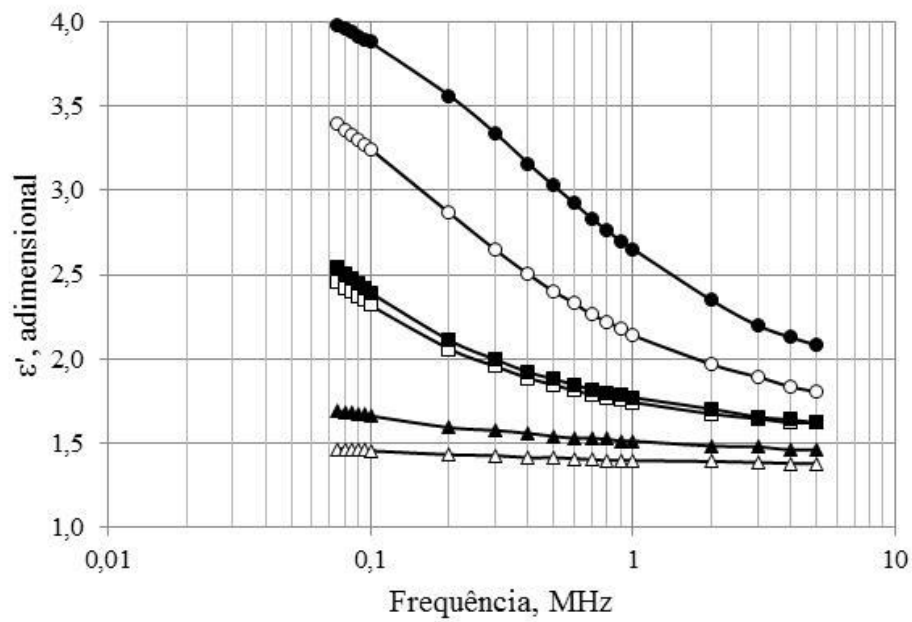


(A)

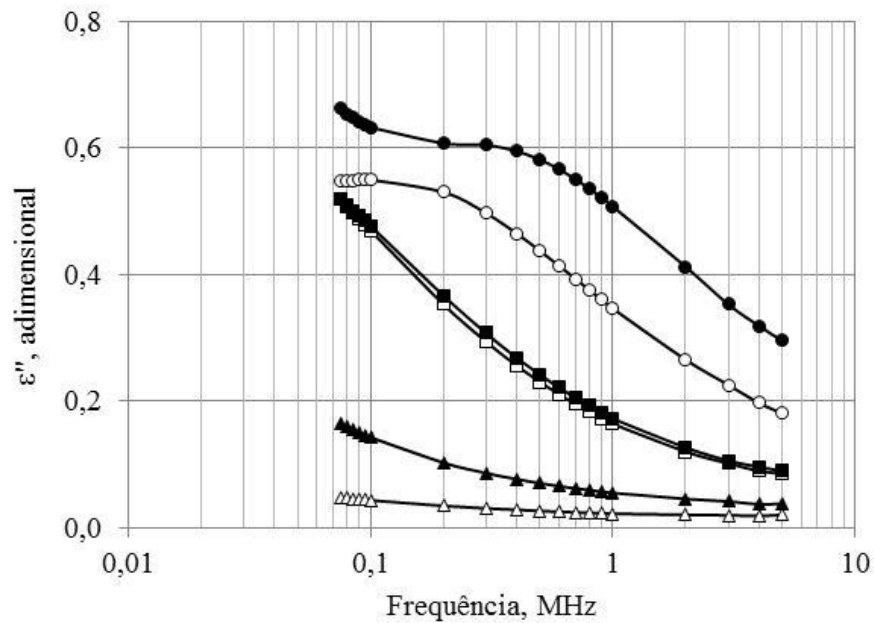


(B)

**Figura 3.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão da cultivar 'Golden', em função da frequência, para valores indicados de teor de água e massa específica aparente de  $162 \pm 2 \text{ kg m}^{-3}$ , a  $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $60 \pm 7\% \text{ UR}$ .  $\triangle$ , 9,1%;  $\blacktriangle$ , 12,5%;  $\square$ , 15,6%;  $\blacksquare$ , 16,2%;  $\circ$ , 19,0%;  $\bullet$ , 21,9%.

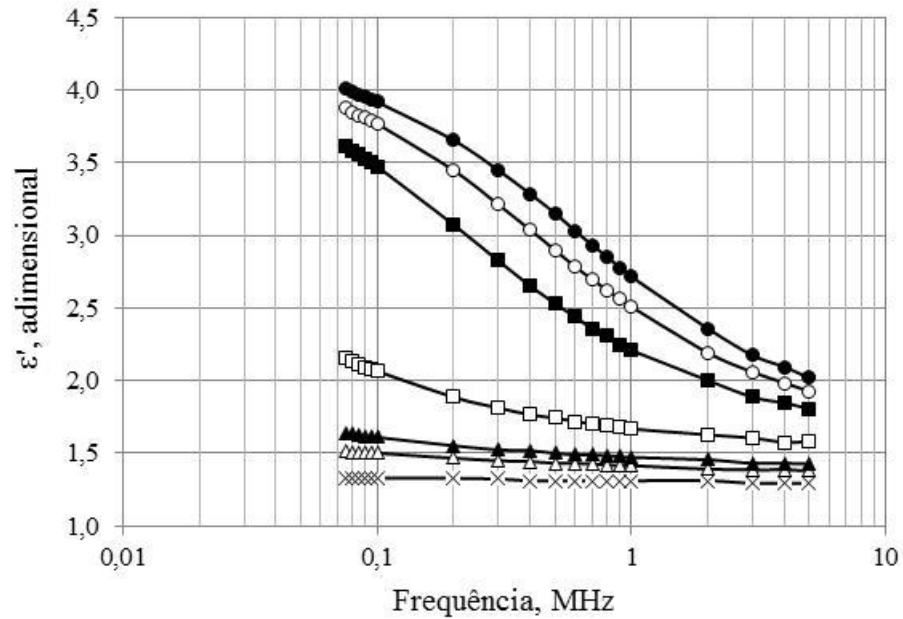


(A)

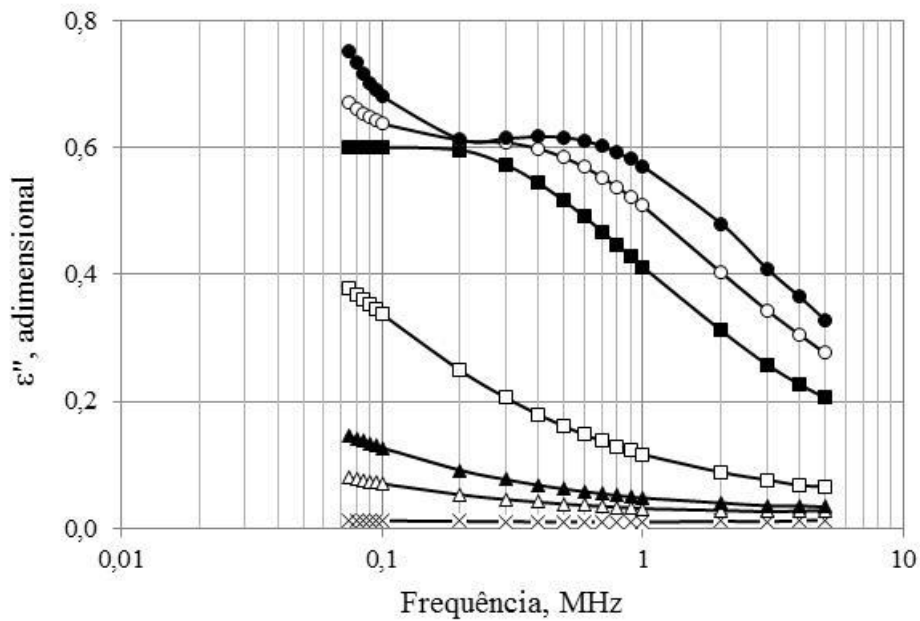


(B)

**Figura 4.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão do híbrido Tainung 01, em função da frequência, para valores indicados de teor de água e massa específica aparente de  $145 \pm 1 \text{ kg m}^{-3}$ , a  $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $56 \pm 5\% \text{ UR}$ .  $\triangle$ , 9,4%;  $\blacktriangle$ , 11,7%;  $\square$ , 14,8%;  $\blacksquare$ , 16,4%;  $\circ$ , 20,9%;  $\bullet$ , 23,1%.



(A)



(B)

**Figura 5.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão do híbrido UENF/CALIMAN 01, em função da frequência, para valores indicados de teor de água e massa específica aparente de  $145 \pm 1 \text{ kg m}^{-3}$ , a  $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $60 \pm 8\%$  UR. x, 6,6%;  $\Delta$ , 9,1%;  $\blacktriangle$ , 11,6%;  $\square$ , 14,7%;  $\blacksquare$ , 17,0%;  $\circ$ , 18,9%;  $\bullet$ , 19,7%.



Verificou-se, também, que para uma mesma frequência,  $\epsilon'$  foi maior para as amostras que continham os maiores teores de água. Em termos comparativos, nas amostras do híbrido Tainung 01 com teores de água de 9,4 e 23,1% b.u. e massa específica aparente 145 e 146 kg m<sup>-3</sup>, a 100 kHz, o valor de  $\epsilon'$  aumentou de 1,46 para 3,88, respectivamente. As amostras com teores de água inferiores a 12% b.u. apresentaram menor variação nos valores de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  em função da frequência.

O fato de o aumento da frequência provocar redução nos valores de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  foi explicado por Kraus e Carver (1984), ou seja, quando um material dielétrico está sujeito à polarização por um campo elétrico de corrente alternada, para cada inversão de sentido das linhas de força desse campo, os dipolos tentam reorientar-se em função dessa mudança de sentido, em um processo que requer algum tempo finito. Para cada tipo de polarização existe um tempo mínimo de reorientação, o qual depende da facilidade com que os dipolos específicos são capazes de se realinhar. A frequência de relaxação é calculada como o inverso desse tempo mínimo de reorientação.

Os mesmos autores destacam que um dipolo não consegue manter a mudança na direção de sua orientação quando a frequência do campo elétrico aplicado excede sua frequência de relaxação e, dessa forma, não contribuirá para a permissividade elétrica relativa, diminuindo também as perdas de energia relacionadas ao valor de  $\epsilon''$ .

A molécula de água presente no interior da semente de mamão é de natureza dipolar, isto é, ela possui um centro de carga assimétrico. Os dipolos são influenciados constantemente pela mudança de polaridade do campo elétrico, apesar de estarem normalmente orientados aleatoriamente. Sendo assim, o campo elétrico tenta arrastá-los e alinhá-los, porém quando o campo elétrico cessa, os dipolos retornam a sua condição inicial (Schiffmann, 2006).

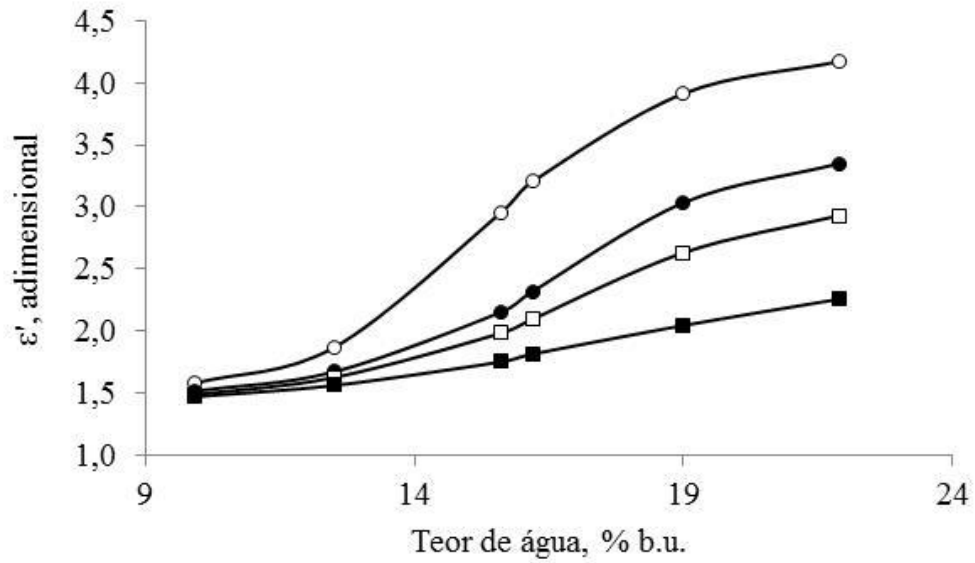
O comportamento do fator de perda dielétrica em função da frequência foi semelhante, apesar de menos regular, do que o observado para os valores de  $\epsilon'$ , principalmente para os maiores valores de teor de água. De forma similar, houve, em geral, decréscimo no valor de  $\epsilon''$  em função do aumento da frequência de oscilação do campo elétrico, para um mesmo valor de teor de água. Para uma mesma frequência, observou-se que os valores de  $\epsilon''$  foram maiores para amostras mais úmidas. A relação entre  $\epsilon''$  e a frequência tornou-se mais complexa

para teores de água acima de 14,8% b.u (UENF/CALIMAN 01 e Tainung 01) e de 16,2% b.u. ('Golden'). Nesses casos, houve alteração brusca na curva de variação de  $\epsilon''$  para frequências próximas a 200 kHz.

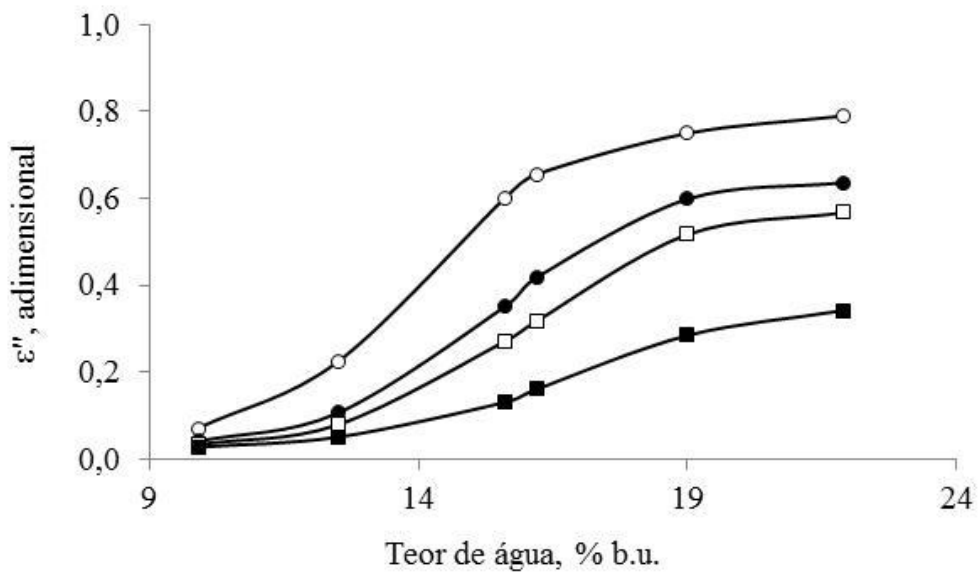
A dispersão nos valores de  $\epsilon''$  em função da frequência foi mais acentuada para maiores valores de teor de água e menores valores de frequência, comportamento também observado por para sementes de cártamo (Sacilik et al., 2007) e de linhaça (Sacilik et al., 2006).

#### 4.2.2. Permissividade elétrica relativa ( $\epsilon'$ ) e fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) em função do teor de água (u)

As Figuras 6, 7 e 8 representam a interação entre  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  e o teor de água das amostras de sementes de mamão da cultivar 'Golden' ( $164 \pm 2 \text{ kg m}^{-3}$ ) e dos híbridos Tainung 01 ( $145 \pm 1 \text{ kg m}^{-3}$ ) e UENF/CALIMAN 01 ( $145 \pm 1 \text{ kg m}^{-3}$ ), respectivamente, para quatro níveis representativos de frequência. Para um mesmo valor de frequência, a permissividade elétrica relativa aumentou com o aumento do teor de água, sendo esse aumento mais intenso para maiores valores de teor de água e menores valores de frequência. Como esperado, a permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  tornou-se menos sensível à variação no teor de água quando a frequência aproximou-se de 5 MHz. Na maioria dos casos avaliados, a permissividade elétrica relativa e o fator de perda dielétrica praticamente independem, ou variam pouco, em função da frequência e do teor de água para valores até 14%-15% b.u. No entanto, a partir desses valores, há uma mudança acentuada na declividade das curvas que mostram a variação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  em função do teor de água. Essa mudança foi considerada um indicativo de alteração nos mecanismos de adsorção da água no interior da semente, ou seja, pode haver ocorrido mudança na forma como a água é retida na matriz das sementes, mudando de estado adsorvido (ligada a algum componente da matriz da semente) para o estado de água livre (absorvida). Schiffmann (2006) explica que a quantidade de água livre presente na amostra contribui para o aumento da permissividade elétrica relativa dos dielétricos devido à alta permissividade elétrica da água sob condição ambiente ( $\epsilon'_{\text{H}_2\text{O}} \cong 78,5$ ). Assim, quanto mais úmido o dielétrico, maior será o valor de sua permissividade elétrica relativa quando comparado com o valor de  $\epsilon'$  de uma amostra mais seca.

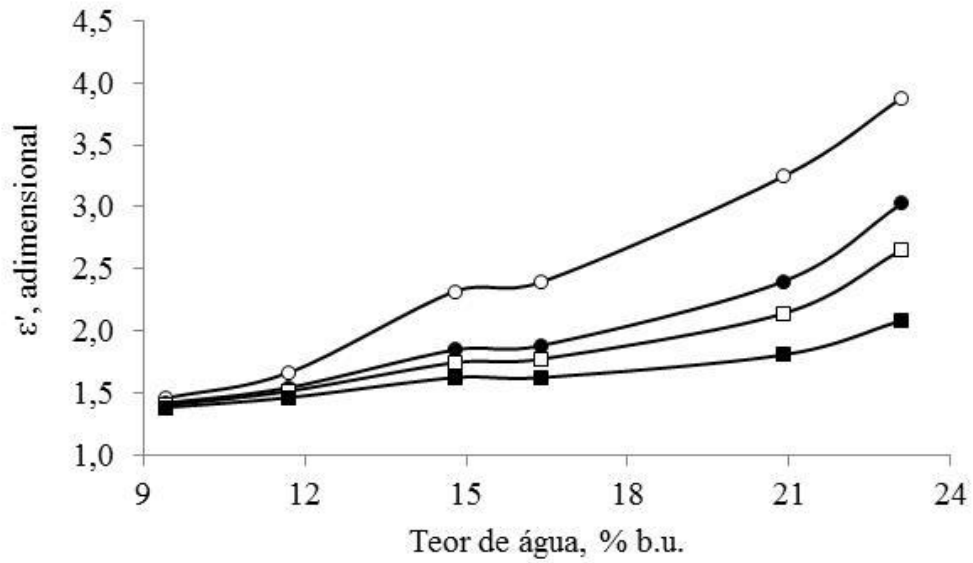


(A)

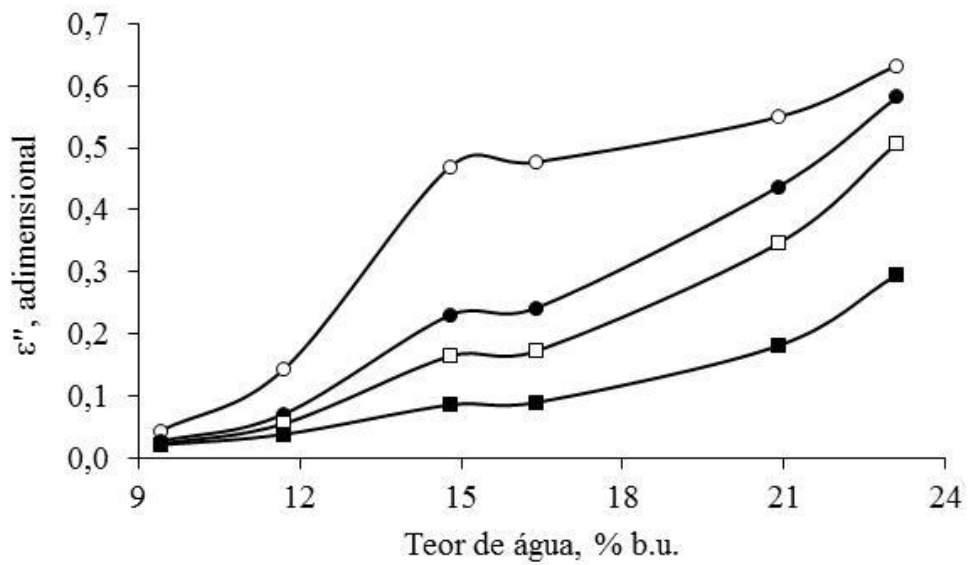


(B)

**Figura 6.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão da cultivar 'Golden' ( $164 \pm 2 \text{ kg m}^{-3}$ ), em função do teor de água, para valores indicados de frequência, a  $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $60 \pm 7\%$  U.R. ○, 0,1 MHz; ●, 0,5 MHz; □, 1 MHz; ■, 5 MHz.

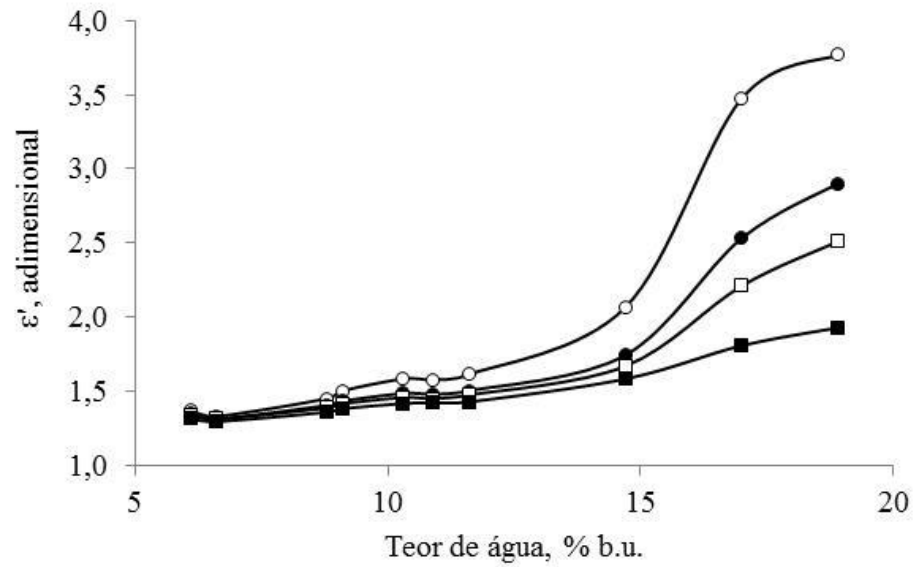


(A)

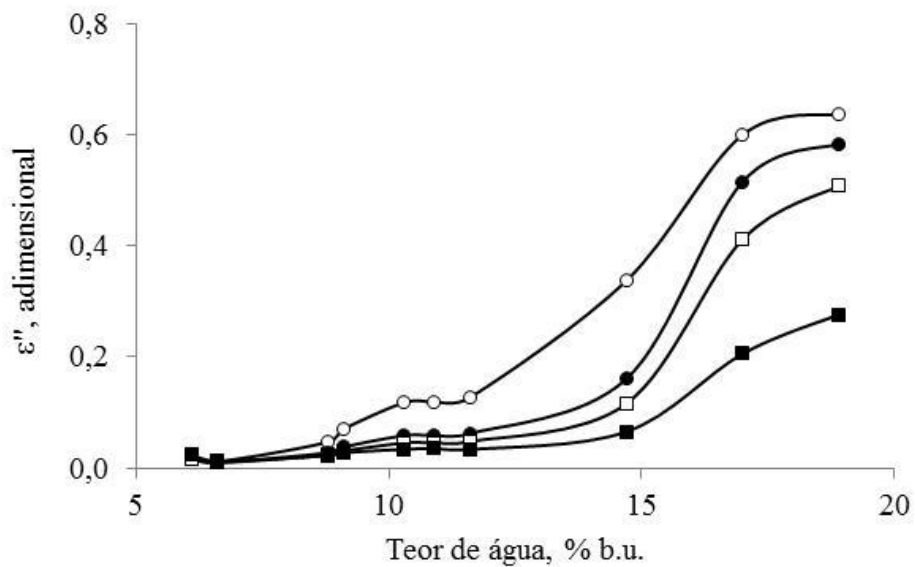


(B)

**Figura 7.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão do híbrido Tainung 01 ( $145 \pm 1 \text{ kg m}^{-3}$ ), em função do teor de água, para valores indicados de frequência, a  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  e  $56 \pm 5\%$  UR. ○, 0,1 MHz; ●, 0,5 MHz; □, 1 MHz; ■, 5 MHz.



(A)



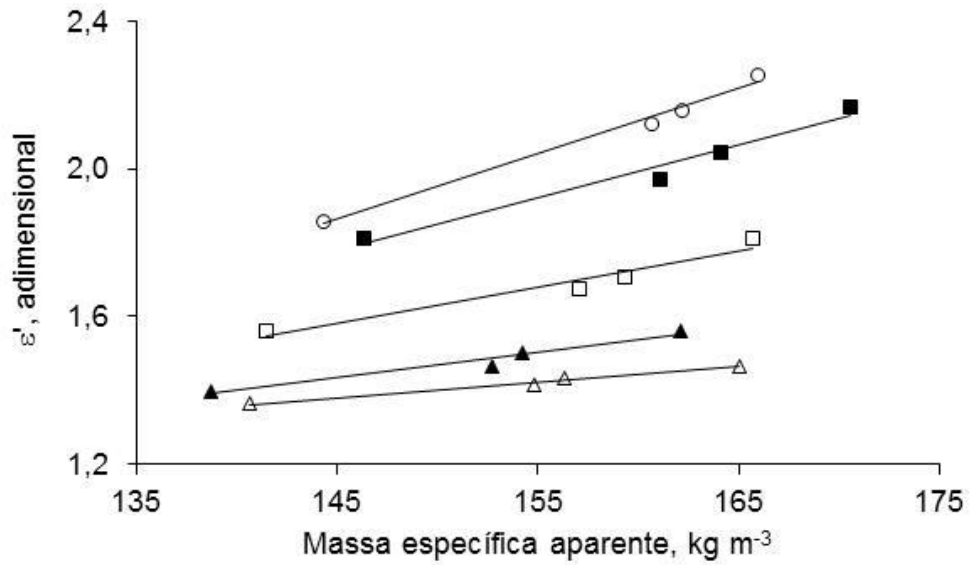
(B)

**Figura 8.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B) para sementes de mamão do híbrido UENF/CALIMAN 01 ( $145 \pm 1 \text{ kg m}^{-3}$ ), em função do teor de água, para valores indicados de frequência, a  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  e  $60 \pm 9\%$  UR. ○, 0,1 MHz; ●, 0,5 MHz; □, 1 MHz; ■, 5 MHz.

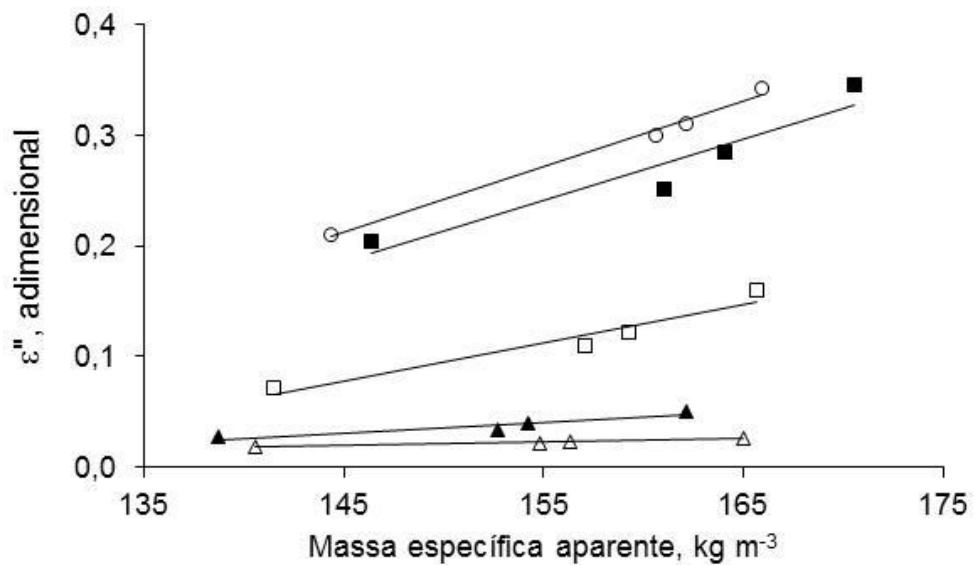
#### 4.2.3. Permissividade elétrica relativa ( $\epsilon'$ ) e fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) em função da massa específica aparente ( $\rho$ )

As curvas de variação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ , a 1 MHz, em função de  $\rho$  para sementes de mamão da cultivar 'Golden' e dos híbridos Tainung 01 e UENF/CALIMAN 01, são mostradas nas Figuras 9, 10 e 11, respectivamente. As relações entre  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  para sementes de mamão da cultivar 'Golden' e do híbrido UENF/CALIMAN 01 foram obtidas pelo método dos mínimos quadrados e são do tipo linear. Para esses dois genótipos, o aumento no valor do teor de água resultou em aumento da declividade das linhas que representam a relação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  e a massa específica aparente. Esse comportamento evidencia que a influência de  $\rho$  nas propriedades dielétricas estudadas é intensificada pelo aumento do teor de água das amostras. Porém, para sementes do híbrido Tainung 01 com elevado teor de água, a relação entre  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  e a massa específica aparente foi melhor descrita por funções polinomiais do segundo grau.

O grupo de linhas nas Figuras 9A, 10A e 11A, para a maior parte dos valores de teor de água, converge para um ponto cujas coordenadas cartesianas são próximas a (0, 1). Desta forma, quando o sensor capacitivo encontra-se vazio e, portanto,  $\rho = 0 \text{ kg m}^{-3}$ , a permissividade elétrica relativa tem um valor muito próximo da unidade, ou seja,  $\epsilon' = 1,0006$ , que é o valor estabelecido para a permissividade elétrica relativa do ar (Kraus e Carver, 1984). De forma similar, o grupo de linhas nas Figuras 9B, 10B e 11B, principalmente para os menores valores de teor de água, converge para um ponto cujas coordenadas cartesianas são próximas a (0, 0). Assim, quando o sensor capacitivo encontra-se vazio, o valor do fator de perda dielétrica aproxima-se de zero, uma vez que o ar é considerado um dielétrico translúcido e que não produz perdas. Todos esses resultados estão de acordo com aqueles observados por Meyer e Schilz (1980), Berbert et al. (2001, 2002b) e Moura (2012).

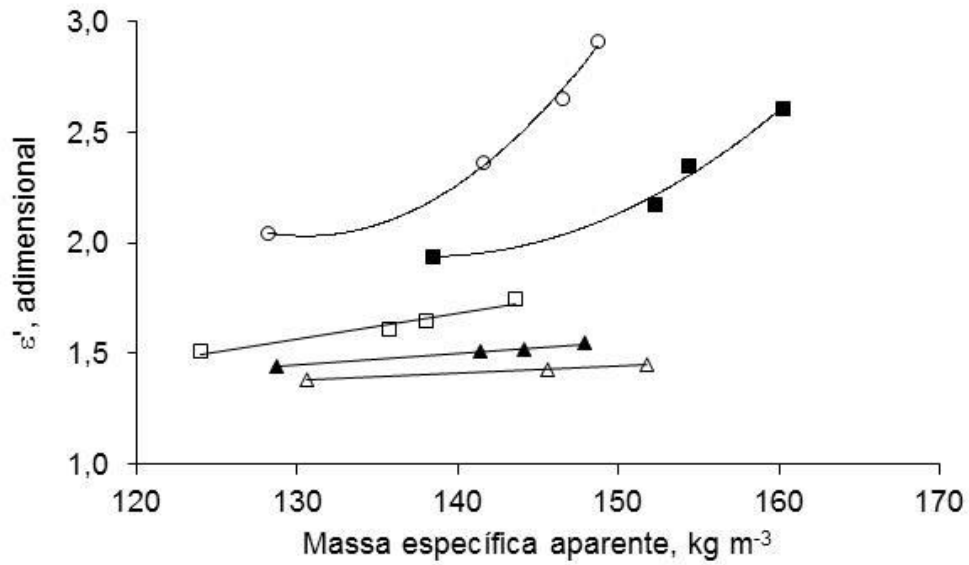


(A)

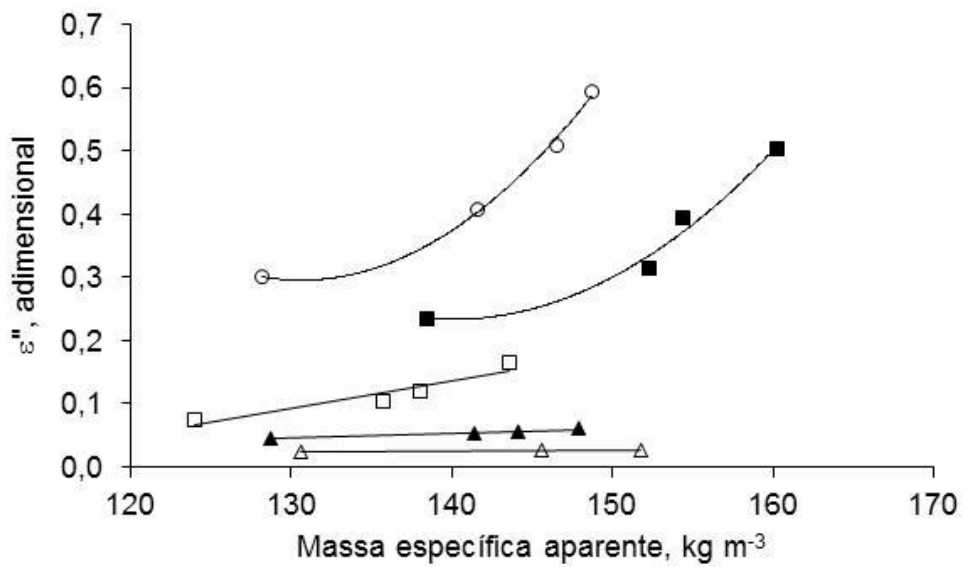


(B)

**Figura 9.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B), a 5 MHz, para sementes de mamão da cultivar 'Golden', para valores indicados de teor de água, a  $23 \pm 1$  °C e  $60 \pm 7\%$  U.R.  $\triangle$ , 9,9%;  $\blacktriangle$ , 12,5%;  $\square$ , 16,2%;  $\blacksquare$ , 19,0%;  $\circ$ , 21,9%.



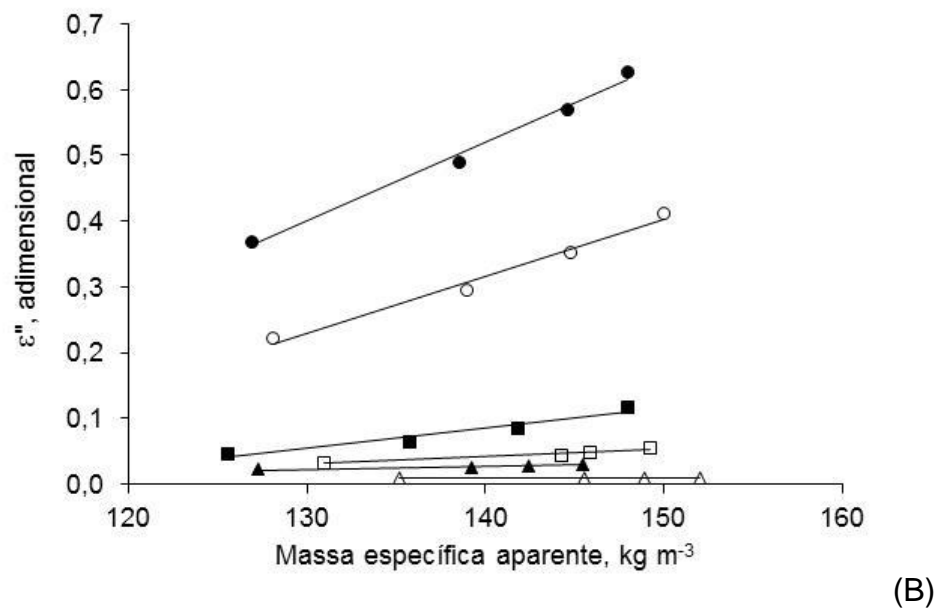
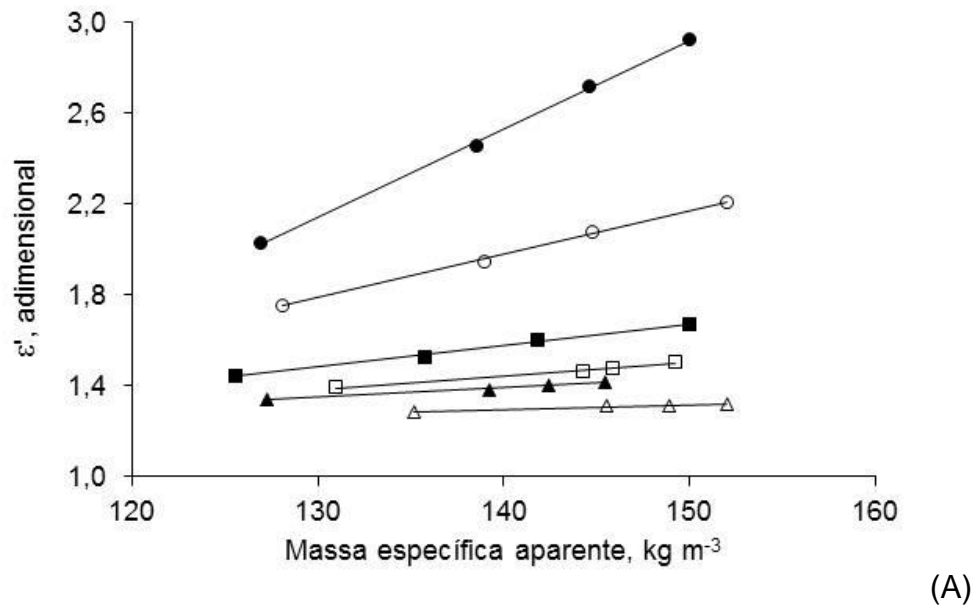
(A)



(B)

**Figura 10.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B), a 1 MHz, para sementes de mamão do híbrido Tainung 01, para valores indicados de teor de água, a  $23 \pm 1$  °C e  $56 \pm 5\%$  U.R.  $\triangle$ , 8,2%;  $\blacktriangle$ , 10,8%;  $\square$ , 14,8%;  $\blacksquare$ , 20,2%;  $\circ$ , 23,1%.

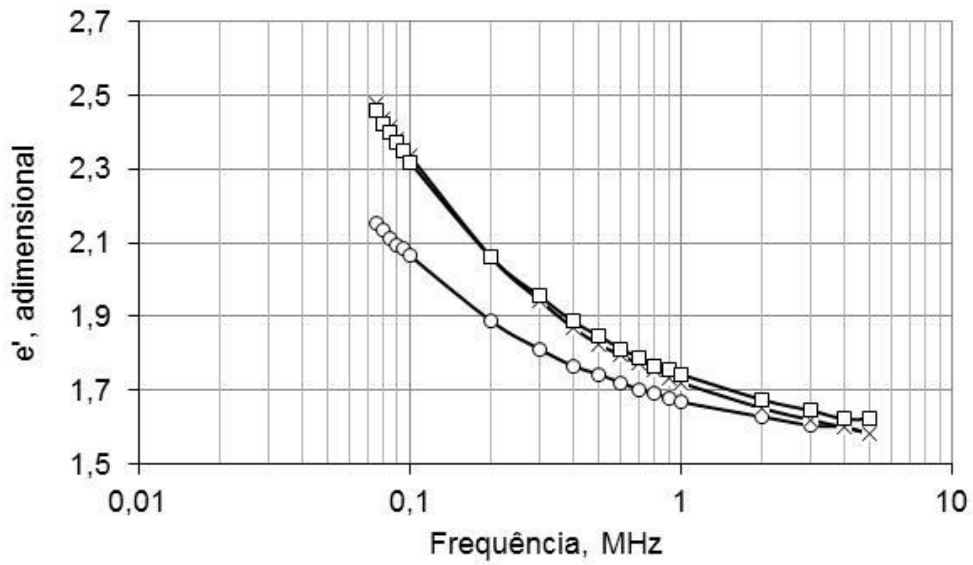




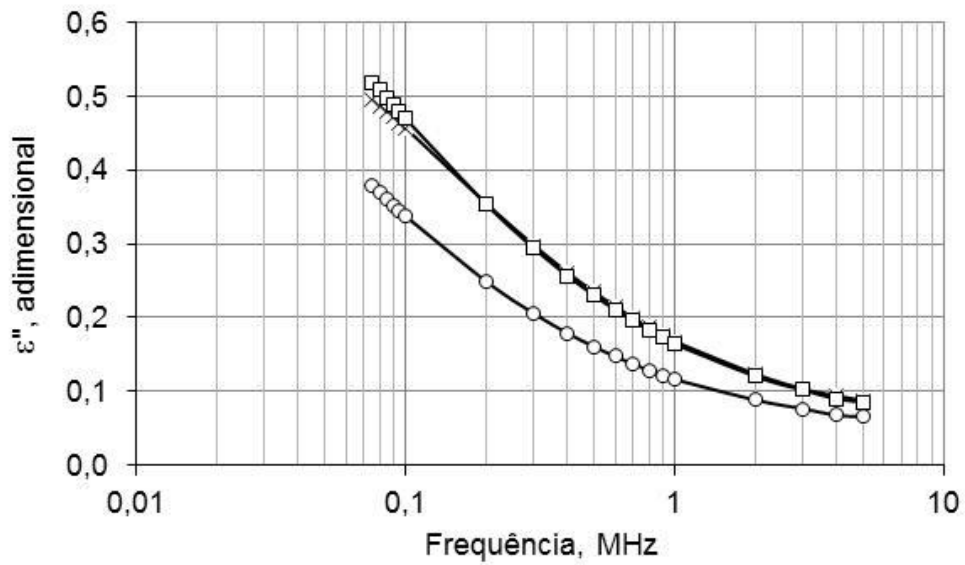
**Figura 11.** Variação da permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B), a 1 MHz, para sementes de mamão do híbrido UENF/CALIMAN 01, para valores indicados de teor de água, a  $23 \pm 1$  C e  $60 \pm 9\%$  U.R.  $\triangle$ , 6,6%;  $\blacktriangle$ , 9,1%;  $\square$ , 11,6%;  $\blacksquare$ , 14,7%;  $\circ$ , 17,0%;  $\bullet$ , 19,7%.

#### 4.2.4. Permissividade elétrica relativa ( $\epsilon'$ ) e fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) em função do genótipo de mamão

Nas Figuras 12A e 12B pode-se observar a influência dos genótipos de mamão sobre as propriedades dielétricas  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ , para sementes com teor de água de 15% b.u. e massa específica aparente média de  $145 \text{ kg m}^{-3}$ . O efeito de cultivar/híbrido sobre  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  mostrou que as sementes da cultivar 'Golden' e do híbrido Tainung 01 possuem propriedades dielétricas semelhantes no espectro de frequências estudado, diferenciando-se daquelas do híbrido UENF/CALIMAN 01, principalmente para frequências inferiores a 1 MHz. Os valores de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  das sementes desse híbrido foram consistentemente inferiores àquelas das demais sementes avaliadas nesse trabalho. Verifica-se que o tipo de genótipo teve menor influência sobre as propriedades dielétricas que as demais variáveis até então consideradas, ou seja, frequência, teor de água e massa específica aparente. Considerando-se apenas as sementes do híbrido UENF/CALIMAN 01 e da cultivar 'Golden', obteve-se variação máxima de 15% no valor de  $\epsilon'$  e de 5% no de  $\epsilon''$ . Apesar dessas pequenas diferenças, é possível que em uma eventual utilização de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  para estimativa do teor de água de sementes de mamão empregando-se o método capacitivo, sejam necessárias curvas de calibração diferentes em função do tipo de genótipo empregado. Berbert et al (2001) observaram variações de 8% na permissividade elétrica relativa e de 22% no fator de perda dielétrica entre três cultivares de café. Os valores correspondentes para quatro híbridos de sorgo, de acordo com Moura (2012) foram de 10 e 64%.



(A)



(B)

**Figura 12.** Efeito do tipo de híbrido/cultivar de mamão na permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  (A) e do fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  (B), para sementes com teor de água de 15% b.u., em ambiente com 24 °C e 61% de UR, para valores indicados de massa específica aparente. O, UENF/CALIMAN 01 (144 kg m<sup>-3</sup>); x, 'Golden' (146 kg m<sup>-3</sup>); □; Tainung 01 (144 kg m<sup>-3</sup>).

## 5. CONCLUSÕES

1. O valor da permissividade elétrica relativa, para cada um dos valores de teor de água das sementes de mamão, e para valores similares de massa específica aparente das amostras, diminuiu de forma regular com o aumento da frequência de 75 kHz para 5 MHz;
2. A variação do fator de perda dielétrica em função da frequência foi ligeiramente menos regular do que a observada para os valores de  $\epsilon'$ . No entanto, para os menores valores de teor de água, o valor de  $\epsilon''$  também diminuiu de forma regular com o aumento da frequência de 75 kHz para 5 MHz. Contudo, a relação entre  $\epsilon''$  e a frequência de oscilação do campo tornou-se mais complexa para teores de água acima de 14,8% b.u (UENF/CALIMAN 01 e Tainung 01) e de 16,2% b.u. ('Golden'). Nesses casos, houve alteração brusca na curva de variação de  $\epsilon''$  para frequências próximas a 200 kHz;
3. Para um mesmo valor de frequência, a permissividade elétrica relativa aumentou com o aumento do teor de água, sendo esse aumento mais intenso para maiores valores de teor de água e menores valores de frequência. A permissividade elétrica relativa tornou-se menos sensível à variação no teor de água quando a frequência aproximou-se de 5 MHz.
4. A permissividade elétrica relativa e o fator de perda dielétrica praticamente independem da frequência e do teor de água para valores até 14% – 15% b.u. No

entanto, a partir desses valores, há uma mudança acentuada na declividade da curva que mostra a variação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  em função do teor de água. Essa mudança foi considerada um indicativo de alteração nos mecanismos de adsorção da água no interior da semente.

5. Em geral, a relação entre  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  e a massa específica aparente é representada por funções lineares crescentes. Mas, as declividades das retas que representam essas funções aumentam à medida que se aumenta o valor da massa específica aparente. Esse comportamento evidencia que a influência de  $\rho$  nas propriedades dielétricas estudadas é intensificada pelo aumento do teor de água das amostras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrostat (2012) Sistema de Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro. Disponível em <http://dw.agricultura.gov.br/dwagrostat> Acesso em 31 de março de 2014.
- Althoff, M.A.; Carmona, R. (1999) Conservação de sementes de mamão (*Carica papaya* L. – Caricaceae). *Revista Brasileira de Sementes*, 21 (1): 151-156.
- Batistuzzo, J.A.O; Eto, Y.; Itaya, M. (2011) *Formulário médico farmacêutico*. 4<sup>o</sup> ed, Ed. Pharmabooks, São Paulo, 785 p
- Beckwar, M.R.; Stanwood, P.C.; Leonhardt, K.W. (1983) Dehydration effects on freezing characteristics and survival in liquid nitrogen of desiccation-tolerant and desiccation-sensitive seeds. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 108 (4): 613-618.
- Berbert, P.A. (1995) *On-Line Density-Independent Moisture Content Measurement of Hard Winter Wheat Using the Capacitance Method*. Thesis (PhD in Agricultural Engineering) – Cranfield University, Silsoe College, 212p.

- Berbert, P.A.; Queiroz, D.M.; Sousa, E.F.; Molina, M.A.B.; Melo, E.C. (2001) Dielectric properties of parchment coffee. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80 (1): 65-80.
- Berbert, P.A.; Melo, E.C.; Queiroz, D.M.; Sousa, E.F.; Faroni, L.R.D. (2002a) Estimativa da massa específica aparente de sementes de trigo utilizando propriedades dielétricas. *Engenharia Agrícola*, 22 (3): 444-451.
- Berbert, P.A.; Queiroz, D.M.; Melo, E. C. (2002b) Dielectric properties of common bean. *Biosystems Engineering*, 83 (4): 449-462.
- Berbert, P.A.; Molina, M.A.B.; Carlesso, V.O.; Oliveira, M.T.R. (2007a) Determinação do teor de água de sementes de café empregando o método da capacitância em radiofrequências. *Revista Brasileira de Sementes*, 29 (2): 159-170.
- Berbert, P.A.; Molina, M.A.B.; Viana, A.P.; Carlesso, V.O.; Oliveira, M.T.R. (2007b) Meyer and Schilz function to estimate common bean seed water content evaluated by radiofrequency. *Scientia Agrícola*, 64 (6): 569-574.
- Berbert, P.A.; Molina, M.B.; Carlesso, V.O., Oliveira, M.R. (2008) Utilização de função dielétrica para estimar o teor de água de sementes de café. *Bragantia*, 67 (2): 541-548.
- Boldor, D.; Sanders, T.H.; Simunovic, J. (2004) Dielectric properties of in-shell and shelled peanuts at microwave frequencies. *Transactions of the ASAE*, 47 (4): 1159-1169.
- Brasil. Regras para análise de sementes. (2009) *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 399p.
- Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C. W. (1992) *Drying and storage of grains and oil seeds*. Van Nostrand Reinhold, New York, 450 p.

- Carlesso, V.O.; Berbert, P.A.; Silva, R.F.; Thiébaud, J.T.L.; Oliveira, M.T.R. (2009a) Germinação e vigor de sementes de mamão (*Carica papaya* L.) cv. golden secadas em altas temperaturas. *Revista Brasileira de Sementes*, 31 (2): 228-235.
- Carlesso, V.O. (2009b) *Secagem e armazenamento de sementes de mamão (Carica papaya L.)* Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 132p.
- Callister, W.D.; Rethwisch, D.G. (2013) *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Tradução de Sérgio Stamile Soares. Rio de Janeiro, LTC, 8.ed., 817p.
- Carvalho, N.M.; Nakagawa, J. (2012) *Sementes: ciência, tecnologia e produção*. 5.ed. Jaboticabal: FUNEP, 590p.
- Dantas, J.L.L.; Pinto, R.M.S.; Lima, J.F.; Ferreira, F.R. (2000) *Catálogo de germoplasma de mamão (Carica papaya L.)*. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 40p.
- Digman, M.F.; Conley, S.P.; Lauer, J.G. (2012) Evaluation of a microwave resonator for predicting grain moisture independent of bulk density. *Applied Engineering in Agriculture*, 28 (4): 611-617.
- Ellis, R.H.; Hong, T.D.; Roberts, E.H. (1991) Effects of storage and moisture on the germination of papaya seeds. *Seed Science Research*, 1 (01): 69-72.
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2012). Base de dados agrícolas FAOSTAT: Cultivos Primários: Mamão Produção. Disponível em: <http://www.fao.org>. Acesso em 31 de março de 2014.
- Ferregueti, G. (2003) *Caliman 01 - O primeiro híbrido de mamão Formosa brasileiro*. Disponível em: [http://www.academia.edu/1525972/CALIMAN\\_01](http://www.academia.edu/1525972/CALIMAN_01) Acesso em 11 de março de 2013.



- Funk, D.B.; Gillay, Z.; Meszaros, P. (2007) Unified moisture algorithm for improved RF dielectric grain moisture measurement. *Measurement Science and Technology*, 18 (4): 1004-1015.
- Guo, W.C.; Nelson, S.O.; Trabelsi, S.; Kays, S.J. (2007a) 10-1800 MHz dielectric properties of fresh apples during storage. *Journal of Food Engineering*, 83 (4): 562-569.
- Guo, W.C.; Nelson, S.O.; Trabelsi, S.; Kays, S.J. (2007b) Dielectric properties of honeydew melons and correlation with quality. *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 41 (2): 44-54.
- Guo, W.; Wang, S.; Tiwari, G.; Johnson, J.A.; Tang, J. (2010) Temperature and moisture dependent dielectric properties of legume flour associated with dielectric heating. *LWT - Food Science and Technology*, 43 (2): 193-201.
- Guo, W.; Zhu, X.; Nelson, S.O.; Yue, R.; Liu, H.; Liu, Y. (2011) Maturity effects on dielectric of apples from 10 to 4500 MHz. *LWT - Food Science and Technology*, 44 (2): 224-230.
- Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. (2009) *Fundamentos de Física 3: eletromagnetismo*. Tradução de Fundamentals of Physics, p. 111-130.
- Hemstreet, J.M. (1982) Dielectric constant of cotton. *Journal of Electrostatics*, 13 (3): 345-353.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012). Base de dados agrícolas SIDRA: Cultivos Permanentes: Mamão. Disponível em: [http:// www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br) ≥ Acesso em 31 de março de 2014.

- Jiao, S.; Johnson, J.A.; Tang, J.; Tiwari, G.; Wang, S. (2011) Dielectric properties of cowpea weevil, black-eyed peas and mung beans with respect to the development of radio frequency heat treatments. *Biosystems Engineering*, 108 (3): 280-291.
- Kandala, C.V.; Sundaram, J. (2010) Nondestructive Measurement of Moisture Content Using a Parallel-Plate Capacitance Sensor for Grain and Nuts. *IEEE Sensors Journal*, 10 (7): 1282-1287.
- Kim, K.B.; Lee, J.W.; Lee, S.S.; Noh, S.H.; Kim, M.S. (2003) On-line measurement of grain moisture content using RF impedance. *Transactions of the ASAE*, 46 (3): 861-867.
- Kraszewski, A.W. (1988). Microwave monitoring of moisture content in grain - further considerations. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 23 (4): 236-246.
- Kraszewski, A.W.; Nelson, S.O. (1994) Determination of moisture content and bulk density of shelled corn by measurement of microwave parameters. *Journal Agricultural Engineering Research*, 58 (1): 37-46.
- Kraus, J.D.; Carver, K.R. (1984) *Electromagnetics*. New York: McGraw-Hill, Inc., 770p.
- Knipper, N.V. (1959) Use of high-frequency currents for grain drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 4 (4): 349-360.
- Lisovsky, V.V. (2007) Automatic control of moisture in agricultural products by methods of microwave aquametry. *Measurement Science and Technology*, 18 (4): 1016-1021.
- Lizhi, H.; Toyoda, K.; Ihara, I. (2008). Dielectric properties of edible oils and fatty acids as a function of frequency, temperature, moisture and composition. *Journal of Food Engineering*, 88 (2): 151-158.

- Lorenzi, H.; Bacher, L.; Lacerda, M.; Sartori, S. (2006) Frutas brasileiras e exóticas cultivadas. São Paulo: *Instituto Plantarum*. 640p.
- Lyra G.B.; Ponciano, N.J.; Sousa, E.F.; Lyra, B.; Sugawara, M.T. (2007). Modelo de crescimento aplicado ao mamoeiro (*Carica papaya* L.) cultivar UENF/CALIMAM 01. In: Reunião de Pesquisa do Frutimamão, 3., Anais. Campos dos Goytacazes: UENF/Caliman, p. 146-149.
- Marin, S.L.D.; Gomes, J.A.; Salgado, J.S.; Martins, D.S.; Fullin, E.A. (1995) *Recomendações para a cultura do mamoeiro dos grupos Solo e Formosa no Estado do Espírito Santo*. 4.ed. Vitória: EMCAPA, 57p.
- McKeown, M.S.; Trabelsi, S.; Tollner, E.W.; Nelson, S.O. (2012) Dielectric spectroscopy measurements for moisture prediction in *Vidalia* onions. *Journal of Food Engineering*, 111 (3): 505-510.
- Meyer, W.; Schilz, W. (1980) A microwave method for density independent determination of the moisture content of solids. *Journal of Physics D*, 13 (10): 1823-1830.
- Morales, M.E.S.; Junco, L.V.; Malo, A. L.; García, H.S. (2010) Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications. *LWT - Food Science and Technology*, 43 (8): 1169-1179.
- Moura, E.E. (2012) *Proposta computacional para medição on-line do teor de água de grãos de sorgo*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 147p.
- Moura, E.E.; Berbert; P.A.; Berbert - Molina, M.A.; Oliveira, M.T.R. (2013) Performance Analysis of RF Dielectric Models for Density-Independent Estimation of Moisture Content in Sorghum, *Powder Technology*, 246: 369-378.

- Nelson S.O.; Soderholm L.H.; Yung F.D. (1953) Determining the dielectric properties of grain. *Agricultural Engineering*, 34 (9): 608-610.
- Nelson, S.O. (1991) Dielectric properties of agricultural products. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 26 (5): 845-869.
- Nelson, S.O. (1994) Measurement of microwave dielectric properties of particulate materials. *Transactions of the ASAE*, 39 (4): 1475-1484.
- Nelson, S.O. (1996) Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. *Journal of Food Engineering*, 2 (1): 365–384
- Nelson, S.O. (1999) Dielectric properties measurement techniques and applications. *Transactions of the ASAE*, 42 (2): 523-529.
- Nelson, S.O. (2005) Dielectric spectroscopy in agriculture. *Journal of Non-Crystalline Solids* 351 (33): 2940-2944.
- Nelson, S.O.; Trabelsi, S.; Kays, S.J. (2006) Dielectric spectroscopy of honeydew melons from 10 MHz to 1.8 GHz for quality sensing. *Transactions of the ASABE*, 49 (6): 1977-1981.
- Nelson, S.O. (2008) Dielectric properties of agricultural products and some applications. *Research in Agricultural Engineering*, 54 (2): 104-112.
- Nelson, S.O.; Trabelsi, S. (2009) Influence of water content on RF and Microwave dielectric behavior of foods. *IMPI, Journal of Microwave Power*, 3 (2): 13-23.
- Nelson, S.O.; Trabelsi, S. (2010) Measurement of Grain and Seed Moisture and Density Through Permittivity Relationships. *In annals of the Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 964-969

- Nelson, S.O.; Trabelsi, S. (2011) Models for the microwave dielectric properties of grain and seed. *Transactions of the ASABE*, 54 (2): 549-553.
- Oliveira, J.R.; Trindade, A.V. (2000) Propagação e formação do pomar. In: *Mamão produção: aspectos técnicos*. Brasília: Embrapa, 77p.
- Pandey, T.; Bhuiya, T.K.; Singh, R.; Singh, B.; Harsh, R. (2012) A review on microwave based moisture measurement system for granular materials. *Journal of Electronics and Communication Engineering*, 3 (2): 37-41.
- Peng, J.; Tang, J.; Jiao, Y.; Bohnet, S.G., Barrett, D.M. (2013) Dielectric properties of tomatoes assisting in the development of microwave pasteurization and sterilization processes. *Food Science and Technology*, 54 (2): 367-376.
- Pérez, E.G. (2004) Melhoramento genético do mamoeiro. Disponível em: <http://todafruta.com.br/portal/> Acesso em 11 de agosto 2013.
- Prasad, A.; Singh, P.N. (2007) A new approach to predicting the complex permittivity of rice. *Transactions of the ASABE*, 50 (2): 573-582.
- Roberts, E.H. (1973) Predicting the storage life of seeds. *Seed Science and Technology* 1 (1): 449-514.
- Ruggiero, C.; Marin, S.L.D.; Durigan, J.F. (2011) Mamão, uma história de sucesso. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33 (1): 76-82.
- Saab, S.C. (2006) Apostila de Física Experimental II, UEPG, 127p.
- Sacilik, K.; Tarimci, C.; Colak, A. (2006) Dielectric properties of flaxseeds as affected by moisture content and bulk density in the radio frequency range. *Biosystems Engineering*, 93 (2): 153-160.

- Sacilik, K.; Tarimci, C.; Colak, A. (2007) Moisture content and bulk density dependence of dielectric properties of safflower seed in the radio frequency range. *Journal of Food Engineering*, 78 (4): 1111-1116
- Sacilik, K.; Colak, A. (2010) Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. *Powder Technology*, 203 (2): 365-370.
- Santana, L.R.R.; Matsura F.C.A.U.; Cardoso R.L. (2004). Genótipos melhorados de mamão (*Carica papaya* L.): avaliação sensorial e físico-química dos frutos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 24 (2): 217-222.
- Santos, R.C.A.; Sampaio, L.S.V.; Costa, J.A. (1999) Condição ambiental, teor de água e embalagem na viabilidade e no vigor de sementes de mamão. *Revista Brasileira de Sementes*, 21 (2): 194-202.
- Santos, S.A.; Silva, R.; Pereira, M.G.; Alves, E.; Machado, J.C.; Borém, F. M.; Guimarães, R.M.; Marques, E.R. (2009). Estudos morfo-anatômicos de sementes de dois genótipos de mamão (*Carica papaya* L.). *Revista Brasileira de Sementes*, 31 (2): 116-122.
- Schiffmann, R.F. (2006) Microwave and Dielectric Drying In: Mujumdar, A.S. (org.) *Handbook of Industrial Drying*. Taylor & Francis Group, LLC, 3° ed. p.307-327.
- Serrano, L.A.L.; Cattaneo, L.F.O. (2010) Cultivo do mamoeiro no Brasil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 32 (3): 0-0.
- TACO - Tabela brasileira de composição de alimentos (2011). Versão II. 4.ed. Campinas, SP: NEPA-UNICAMP, 161p.
- Teng, Y.; Hor, Y.L. (1976) Storage of tropical fruit seeds. *Selangor: University Pertanian*, p.135-146.

- Trabelsi, S.; Nelson, S.O. (2004) Calibration methods for nondestructive microwave sensing of moisture content and bulk density of granular materials. *Transactions of the ASAE*, 47 (6): 1999-2008.
- Trabelsi, S.; Nelson, S.O. (2006) Nondestructive sensing of physical properties of granular materials by microwave permittivity measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 55 (3): 953-963.
- Trabelsi, S.; Nelson, S.O.; Lewis, M.A. (2009) Microwave nondestructive sensing of moisture content in shelled peanuts independent of bulk density and with temperature compensation. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 3 (2): 114–121.
- Trabelsi, S.; Paz, A.M.; Nelson, S.O. (2013) Microwave dielectric method for the rapid, nondestructive determination of bulk density and moisture content of peanut hull pellets. *Biosystems Engineering*, 115 (3): 332-338.
- Tulasidas, T.N.; Raghavan, G.S.V.; Voort, F.V.; Girard, R. (1995) Dielectric properties of grapes and sugar solutions at 2.45 GHz. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 30 (2): 117-123.
- USDA – United States Department of Agriculture (2013) Plants Database. Disponível em  $\leq$  <http://plants.usda.gov>  $\geq$  Acesso em 21 de abril de 2013.
- Venkatesh, M.S.; Raghavan, G.S.V. (2005) An overview of dielectric properties measuring techniques. *Canadian Biosystems Engineering*, 47 (7): 15-30.
- Wang, Y.; Zhang, L.; Gao, M.; Tang, J.; Wang, S. (2013) Temperature- and moisture-dependent dielectric properties of macadamia nut kernels. *Food and Bioprocess Technology*, 6 (8): 2165-2176.
- Young, H.D.; Freedman, R.A. (2009) Física III: eletromagnetismo tradução de Sear and Zemansky's University physics. São Paulo: Pearson Education do Brasil.

Zhu, X.; Guo, W.; Wu, X. (2012) Frequency- and temperature-dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating. *Journal of Food Engineering*, 109 (2): 258–266.

Zhu, X.; Guo, W.; Wang, S. (2013) Sensing moisture content of buckwheat seed from dielectric properties. *Transactions of the ASABE*, 56 (5): 1855-1862.