

**MOISÉS LUIZ LAGARES JÚNIOR**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA CAPACITIVO  
PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE DE SEMENTES  
EMBARCADO EM UMA COLHEDORA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2009

**MOISÉS LUIZ LAGARES JÚNIOR**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA CAPACITIVO  
PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE DE SEMENTES  
EMBARCADO EM UMA COLHEDORA**

**Tese** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Morais de Sousa

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Machado dos Santos

Uberlândia - MG

2009

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L173d	<p>Lagares Júnior, Moisés Luiz, 1974-          Desenvolvimento de um sistema capacitivo para medição de umidade de sementes embarcado em uma colhedora / Moisés Luiz Lagares Júnior. - 2009.          171 f. : il.</p> <p>Orientador: Marcos Morais de Sousa.          Co-orientador: Carlos Machado dos Santos.</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.          Inclui bibliografia.</p> <p>1. Medidores de umidade - Teses. I. Sousa, Marcos Morais de. II. Santos, Carlos Machado dos. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 531.48</p>
-------	---

*"Há três coisas que não voltam atrás: a flecha lançada,  
a palavra pronunciada e a oportunidade perdida"*

Provérbio Chinês

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso;

Ao Prof. Dr. Marcos Morais de Sousa pela orientação e inestimável apoio, materializados pelo interesse, amizade e respeito, sempre presentes em nosso trabalho;

Ao Prof. Dr. Carlos Machado dos Santos pela co-orientação, oferecendo com extrema generosidade todos os recursos disponíveis;

Aos membros do Laboratório de Sementes - LASEM - do Instituto de Ciências Agrárias da UFU, em especial aos técnicos Adílio de Sá Júnior e Sara Moraes Mendes Almeida, pelo apoio na realização dos experimentos, mas, principalmente, pela experiência e conhecimento adquiridos;

Às alunas do PET-agronomia, Letícia Magalhães Teixeira e Marcela Borges, que muito colaboraram nos experimentos de aferição do protótipo desenvolvido, trabalhando com dedicação e presteza;

Aos membros do Instituto Intelecto, que colaboraram com especial atenção no processo de patente do invento;

À Mecamáquina Ltda pelo apoio financeiro na forma de construção do protótipo;

À Fazenda Pombo, Monsanto do Brasil, Sementes Primaiz e Syngenta Seeds, pela doação de

vi

material para experimentos;

À CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos;

À todos que em mim depositaram sua confiança e, mesmo não colaborando diretamente na área técnica, dirigiram suas boas energias, pensamentos, orações, palavras e intensões em favor da concretização de um sonho.

LAGARES Jr, M. L., **Desenvolvimento de um Sistema Capacitivo para Medição de Umidade de Sementes Embarcado em uma Colhedora**. 2009. 168 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento do protótipo de um sistema de medição de umidade de sementes, que possa ser embarcado em uma colhedora para colheita e análise de parcelas experimentais e que atenda às necessidades das empresas de pesquisa que atuam no melhoramento de plantas. Este sistema está disponível no comércio, porém é importado a alto custo. A construção do sistema de medição de umidade foi feita obedecendo a alguns requisitos previamente definidos. Trabalhando com uma frequência fixa de  $10\text{ kHz}$ , distingue-se por reunir características construtivas dos sensores capacitivos de placas paralelas bem como os de cilindros concêntricos. Sua calibração foi feita utilizando sementes de milho (*Zea mays L.*) umedecidas artificialmente mediante metodologia desenvolvida preliminarmente. A curva de calibração foi obtida pela correlação da tensão de saída do sensor com o teor de água presente na amostra de sementes. O modelo (estimado pelo método de regressão por mínimos-quadrados e avaliado por análise de variância) consiste de três retas que delimitam três faixas de leitura (selecionadas automaticamente pelo sistema). A faixa capaz de medição de umidade corresponde à de 10 a 30 %. A aferição do sistema foi delineada pela comparação dos resultados do protótipo com os resultados obtidos por um método padrão de estufa e auxiliada por outros três métodos indiretos de medição. Assim, a proposta de desenvolvimento do protótipo foi atingida através da construção de um sistema de medição de umidade que atende aos requisitos de construção impostos, possuindo correção automática de leitura em função da temperatura ambiente e atendendo a todas as condições para ser embarcado em colhedoras.

*Palavras Chave: Sensor capacitivo, Umidade de sementes, Colheita de unidades experimentais, Medidor de umidade.*

LAGARES Jr, M. L., **An Capacitive System Design to Seed Moisture Measurement embedded on a Combine**. 2009. 168 f. Doctor Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### ABSTRACT

The aim of this research was to develop a seed moisture measurement system (M.M.S.) prototype that could be embedded on a combine to harvest and analyze experimental plots. It must be able to reach the claims of seed research companies. This kind of system is trade available, though there is no technology designed in Brazil and it is imported in a high cost. To reach the aim, seven construction requirement were defined. The M.M.S. was designed and constructed obeying such requirements. Fixed frequency in  $10\text{ kHz}$ , its operation distinguishes itself by gathering constructive characteristics capacitive sensors of parallel plates as well as concentric cylinders. Its calibration was performed using corn seeds (*Zea mays* L.) artificially moistened through methodology that was preliminarily developed. The calibration curve was obtained by the correlation between the sensor output voltage and the moisture seed sample. Modeling (estimated by Linear Least Squares Fitting technique and evaluated by analysis of variance) consists of three lines which delimit three reading bands (selected automatically by system). The total M.M.S. reading extends from 10 to 30 %. The system checking was comprised by comparing the prototype results to results obtained by standard oven method and three other indirect measurement methods. Thus, the prototype was achieved through the construction of a moisture measurement system that attends the construction requirements, using automatic reading temperature correction and taking into account all the conditions to be embedded on combines.

*Keywords: Capacitive Sensor, seed moisture, Experimental plot harvest, moisture measurer.*



## Lista de Figuras

2.1	Esquema de um capacitor de placas paralelas . . . . .	9
2.2	Variação da constante dielétrica com a frequência de um campo elétrico alternado. (CALLISTER, 2003) . . . . .	12
2.3	Variação de $\epsilon'$ com o teor de umidade em função da frequência para o trigo, 21-24 °C: ○ 0,5 MHz; □ 1,0 MHz; △ 5,0 MHz (BERBERT E STENNING, 1997)	18
2.4	Variação de $\epsilon''$ com o teor de umidade em função da frequência para o trigo, 21-24 °C: ○ 0,5 MHz; □ 1,0 MHz; △ 5,0 MHz (BERBERT E STENNING, 1997)	18
2.5	Variação de $\epsilon'$ com teor de umidade em função da frequência para a semente de <i>safflower</i> : □ 100 kHz; ◇ 500 kHz; △ 1 MHz; ○ 5 MHz; □ 10 MHz (SACILIK, TARIMCI AND COLAK, 2006) . . . . .	19
2.6	Variação de $\epsilon''$ com teor de umidade em função da frequência para a semente de <i>safflower</i> : □ 100 kHz; ◇ 500 kHz; △ 1 MHz; ○ 5 MHz; □ 10 MHz (SACILIK, TARIMCI AND COLAK, 2006) . . . . .	20
2.7	Raiz quadrada da função calibração independente da densidade $\xi$ para o trigo ver- sus teor de umidade, 14,2 GHz, 24 °C (TRABELSI, KRAZSEWISK E NELSON, 1998) . . . . .	20
2.8	Variação de $\epsilon'$ com o teor de umidade para o arroz a 24 °C (NELSON, 1992) . .	21
2.9	Variação de $\epsilon'$ com o teor de umidade para o feijão a 20 °C: □ 659 kg/m <sup>3</sup> ; ○ 800 kg/m <sup>3</sup> ; △ 844 kg/m <sup>3</sup> (BERBERT ET AL, 2004) . . . . .	21
2.10	Curva representativa do modelo de Debye para uma substância molecular pura (DEBYE, 1929 APUD NELSON, 1991) . . . . .	23
2.11	Diagrama Cole-Cole para uma substância polar com tempo de relaxação único (DEBYE, 1929 apud NELSON, 1991) . . . . .	24

2.12	Variação de $\epsilon'$ com a frequência para a semente de <i>safflower</i> (de baixo para cima): 5,33% (denso), 5,33% (livre), 8,12% (denso), 8,12% (livre), 10,91% (denso), 10,91% (livre), 13,70% (denso), 13,70% (livre), 16,48% (denso), 16,48% (livre) (SACILIK, TARIMCI AND COLAK, 2006) . . . . .	26
2.13	Variação de $\epsilon'$ e $\epsilon''$ com a frequência para o trigo a 24 °C (NELSON AND STET- SON, 1976 APUD NELSON ET AL, 2000) . . . . .	26
2.14	Dependência da frequência em função de $\xi$ para o trigo, 24 °C (TRABELSI, KRAZSEWISK e NELSON, 1998) . . . . .	27
2.15	Variação de $\epsilon'$ e $\epsilon''$ do trigo em função da temperatura, a 8 GHz, $\odot M = 15,7\%$ , $\ominus M = 23,6\%$ (TRABELSI E NELSON, 2004) . . . . .	28
2.16	Peso Específico Aparente e Real e Porosidade em função da Umidade para o amendoim e arroz em casca, nesta seqüência (BENEDETTI E JORGE, 1987) . . .	31
2.17	Peso Específico Aparente e Real e Porosidade em função da Umidade para o feijão e milho, nesta seqüência (Benedetti e Jorge (1987)) . . . . .	32
2.18	Peso Específico Aparente e Real e Porosidade em função da Umidade para a soja e trigo, nesta seqüência (Benedetti e Jorge (1987)) . . . . .	32
2.19	Três possíveis configurações para cuba sensora segundo Matthews (1963): placas paralelas, cilindros concêntricos e base colar de condução, nesta seqüência . . .	34
2.20	Desenho do capacitor utilizado por Berbert e Stenning (1997) para determinação das propriedades dielétricas do trigo . . . . .	36
2.21	Desenho do capacitor utilizado por Lawrence, Funk e Windham (1999) para de- terminação do teor de umidade do milho . . . . .	37
2.22	Desenho do capacitor utilizado por Ediger e Boelts (1990) para determinação do teor de umidade de grãos armazenados em secadores de grãos . . . . .	37
2.23	Diagrama de blocos do circuito eletrônico proposto por Ediger e Boelts (1990) . .	38
2.24	Desenho do capacitor projetado por Nelson <i>et al</i> (2001), montado em colhedora para determinação do teor de umidade de grãos . . . . .	39
2.25	Desenho do capacitor projetado por Rains <i>et al</i> (2005), montado em colhedora para determinação do teor de umidade de grãos . . . . .	40

3.1	Diagrama esquemático do Sistema de Medição de Umidade (S.M.U.) . . . . .	45
3.2	Desenho de conjunto da cuba sensora . . . . .	48
3.3	Concepção final da cuba sensora . . . . .	49
3.4	Esquema do circuito elétrico utilizado por Mamishev et al (2002) . . . . .	49
3.5	Esquema do circuito elétrico utilizando o sensor de medição de umidade . . . . .	50
3.6	Resposta em frequência de um instrumento de primeira ordem dada pelas equações 3.15 e 3.16 (Doebelin, 1990) . . . . .	53
3.7	Simulação da amplitude da razão entre os sinais de saída $U_s$ e entrada $U_e$ para os seguintes valores de capacitância: 29, 88, 300, 500, 700, 1000, 2000, 3000 e 6500 pF ( $R_2$ constante igual a 1 G $\Omega$ ): (a) $R_1$ igual a 10 k $\Omega$ (b) $R_1$ igual a 100 k $\Omega$ . . . . .	56
3.8	Simulação da FRF para $R_1$ igual a 10 k $\Omega$ : (a) Amplitude da razão entre os sinais de saída $U_s$ e entrada $U_e$ (b) Ângulo de Fase entre os sinais de entrada $U_e$ e saída $U_s$ . . . . .	57
3.9	Simulação da FRF para $R_1$ igual a 100 k $\Omega$ : (a) Amplitude da razão entre os sinais de saída $U_s$ e entrada $U_e$ (b) Ângulo de Fase entre os sinais de entrada $U_e$ e saída $U_s$ . . . . .	58
3.10	Simulação da diferença entre $U_s/U_e$ para milho seco (88 pF - 11 %) e $U_s/U_e$ para milho úmido (6500 pF - 27 %) quando submetido a uma $U_e$ igual a 10 V pico-a-pico senoidal: (a) $R_1$ igual a 10 k $\Omega$ (b) $R_1$ igual a 100 k $\Omega$ . . . . .	59
3.11	Valores experimentais da diferença entre $U_s/U_e$ para milho seco (11 %) e $U_s/U_e$ para milho úmido (27%) em função da frequência quando submetido a uma $U_e$ igual a 10 V pico-a-pico senoidal: (a) $R_1$ igual a 10 k $\Omega$ (b) $R_1$ igual a 100 k $\Omega$ . . . . .	61
3.12	Diferença entre $U_s/U_e$ para sensor vazio e $U_s/U_e$ para milho seco (11 %) . . . . .	62
3.13	Projeto do circuito eletrônico do sensor de umidade . . . . .	64
3.14	Circuito eletrônico montado em um <i>protoboard</i> . . . . .	64
3.15	Configuração final do protótipo do S.M.U. . . . .	66
3.16	Aferição da placa A/D do C.L.P. . . . .	67
4.1	Bancada experimental para determinação da influência da temperatura e densidade de uma amostra de sementes sobre a tensão de saída $U$ do S.M.U. . . . .	71

4.2	Diagrama para interpretação dos resultados do planejamento fatorial a dois níveis	73
4.3	Conjunto com tela para umidificação de sementes: (a) mesa com tampo de tela (b) mesa com tampo de tela, preenchida com soja e montada em recipiente plástico	75
4.4	Amostra de milho para umidificação: uma camada de milho entre duas folhas de papel de germinação . . . . .	76
4.5	Amostras de milho para umedecimento . . . . .	77
4.6	Modelo estimado para calibração do S.M.U. com milho: (a) modelo linear (b) distribuição dos resíduos . . . . .	81
4.7	Modelo estimado para calibração do S.M.U. com milho: (a) modelo cúbico (b) distribuição dos resíduos . . . . .	82
4.8	Modelo estimado para calibração do S.M.U. com milho: (a) modelo cúbico (b) distribuição dos resíduos . . . . .	83
4.9	Calibração do S.M.U. para milho referente aos dados da Tab. 4.10 . . . . .	85
4.10	Modelo linear estimado para milho seco à 24 °C: (a) curva de ajuste (b) distribuição dos resíduos . . . . .	88
4.11	Modelo inverso do teor de água estimado para milho úmido à 24 °C: (a) curva de ajuste (b) distribuição dos resíduos . . . . .	88
4.12	Modelo linear estimado para milho úmido à 24 °C: (a) curva de ajuste (b) distribuição dos resíduos . . . . .	89
4.13	Modelo linear estimado para milho extra-úmido à 24 °C: (a) curva de ajuste (b) distribuição dos resíduos . . . . .	90
4.14	Variação do Pap com o teor de água . . . . .	94
4.15	Comparação entre os Pap obtidos via ensaios e valores de Pap obtidos via modelo construído por Benedetti e Jorge (1987) . . . . .	95
4.16	Fluxograma para correção automática de $U$ em função da temperatura. $T$ - temperatura lida pelo termoresistor; $U$ - tensão de saída do sensor de umidade; $UC$ - tensão de saída corrigida; $DIF$ - diferença entre a temperatura referência e a temperatura lida . . . . .	98

4.17 Fluxograma para seleção da curva de calibração. UC - tensão de saída corrigida pela temperatura; COEF A - coeficiente A da curva de calibração; COEF B - coeficiente B da curva de calibração; AUX - variável auxiliar nos cálculos; M - teor de água . . . . .	100
4.18 Configuração final do sensor de umidade . . . . .	103
5.1 Esquema do experimento em campo, instalado na fazenda Pombo para aferição do S.M.U., município de Uberlândia, MG . . . . .	106
5.2 Detalhe da unidade experimental do experimento conduzido para aferição do S.M.U. na fazenda Pombo, município de Uberlândia, MG . . . . .	107
5.3 Valores de teor de água (%) obtidos pelos sistemas de medição, com amostras coletadas em diferentes graus de teor de água, para aferição do protótipo . . . . .	108
5.4 Isoterma de sorção de água em sementes em função da umidade relativa do ar (CARVALHO, 1994) . . . . .	110
5.5 Comparação entre curva de calibração a 24 °C em condições de laboratório e dados obtidos com medidor de umidade portátil Dikey John em condições de campo	111
5.6 Variação da constante dielétrica e fator de perda com a frequência de um campo elétrico alternado. (GUERRA, 2004) . . . . .	113



## Lista de Tabelas

2.1	Constante dielétrica de alguns materiais. Propriedades válidas à temperatura ambiente e em condições tais que o campo elétrico não varia com o tempo. (HALLIDAY E RESNICK, 1981). . . . .	11
2.2	Propriedades dielétricas da água pura submetida a um campo elétrico alternado (HASTED, 1973 APUD NELSON, 1991) . . . . .	24
3.1	Valores de $R_2$ e $C$ para sensor vazio e cheio com milho seco e úmido . . . . .	55
3.2	Levantamento experimental das faixas de sensibilidade do sensor de umidade . . . . .	60
3.3	Valores médios obtidos da aferição do C.L.P. . . . .	67
4.1	Planejamento fatorial a dois níveis . . . . .	70
4.2	Variação da Tensão em vazio e Massa para o planejamento fatorial a dois níveis (D.P. - Desvio Padrão) . . . . .	71
4.3	Tensões de Saída (U) respostas para o planejamento fatorial a dois níveis . . . . .	72
4.4	Efeitos calculados para o planejamento fatorial a dois níveis . . . . .	73
4.5	Procedimento para umidificação de sementes milho . . . . .	76
4.6	Volume de água ( $v_a$ ), teor de água (G800) e massa das amostras (massa), determinados diariamente, visando atingir os teores alvo de água das sementes de milho destinadas à calibração do S.M.U. . . . .	79
4.7	Tensão de saída U medida no ensaio de calibração do sensor de umidade a diferentes teores de água para milho - primeira etapa . . . . .	81
4.8	Tensão de saída U medida no ensaio de calibração do sensor de umidade a diferentes teores de água para milho - segunda etapa . . . . .	81

4.9	Tensão de saída U medida no ensaio de calibração do sensor de umidade a diferentes teores de água para milho - terceira etapa . . . . .	82
4.10	Valores médios de teor de água $\bar{M}$ em porcentagem (obtidos pelo método de estufa a 105 °C) e da tensão $\bar{U}$ em volts, a diferentes temperaturas, para calibração do S.M.U. de sementes de milho, operando de 5 a 30 % de teor de água, variação de temperatura de 10 a 45 °C e temperatura de referência 24 °C . . . . .	84
4.11	Tabela de análise de variância do modelo linear obtido para milho seco a 24 °C .	90
4.12	Tabela de análise de variância do modelo linear obtido para milho úmido a 24 °C	91
4.13	Tabela de análise de variância do modelo linear obtido para milho extra-úmido a 24 °C . . . . .	91
4.14	Variação da $U_{vazio}$ em função da Temperatura . . . . .	92
4.15	Média dos Pap obtidos via ensaios e valores de Pap obtidos via modelo construído por Benedetti e Jorge (1987) . . . . .	94
4.16	Valores de tolerância para cada classe de PT-100 (ORLANDO, 2003) . . . . .	97
5.1	Valores de teor de água (%) obtidos pelos sistemas de medição, com amostras coletadas em diferentes graus de teor de água, para aferição do protótipo . . . . .	108
8.1	Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 24°C - primeira etapa . . . . .	125
8.2	Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 24°C - segunda etapa . . . . .	126
8.3	Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 24°C - terceira etapa . . . . .	127
8.4	Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 10°C . . . . .	127
8.5	Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 17°C . . . . .	128
8.6	Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 35°C . . . . .	128



8.7 Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes  
de milho a 45°C . . . . . 129



## Lista de Símbolos

$b.u.$	- base do peso úmido, utilizado para identificar como o teor de água foi obtido
$f$	- Frequência em $Hz$
$f_c$	- Frequência de corte
$g$	- Unidade de massa em gramas
$i$	- Constante imaginária de um número complexo equivalente a $\sqrt{-1}$
$k$	- Concentração de água em massa de grãos por unidade de volume
$l$	- Distância entre as placas paralelas de um capacitor
$m$	- Unidade de comprimento em metro
$mm$	- Unidade de comprimento em milímetro
$m_w$	- Massa de água contida nos grãos
$m_d$	- Massa de material seco (massa de grãos secos)
$t$	- Massa do recipiente (com tampa) que contém as amostras para medição de teor de água em estufa a $105^\circ C$
$v$	- volume
$va$	- volume de água adicionado às amostras de milho para umedecimento artificial
$A$	- Área das placas de um capacitor
$C$	- Capacitância
$F$	- Unidade de capacitância elétrica em Farad
$G800$	- Teor de água de sementes obtido pelo sistema comercial de medição de teor de água Geole® G800, de princípio capacitivo
$K$	- Sensibilidade estática
$M$	- Teor de água de sementes obtido pelo método padrão de estufa a $105^\circ C$ (em porcentagem, base do peso úmido)
$P$	- Porosidade
$PI$	- Massa inicial da amostra utilizada na medição de teor de água em estufa a $105^\circ C$
$PF$	- Massa final da amostra utilizada na medição de teor de água em estufa a $105^\circ C$
$P_{ap}$	- Peso Específico Aparente
$P_r$	- Peso Específico Real
$Q$	- Quantidade de carga elétrica, dada em Coulombs
$R_1$	- Resistor divisor de tensão
$R_2$	- Resistência elétrica interna do sensor capacitivo

$T$	-	Temperatura
$U$	-	Tensão retificada (constante) de saída do S.M.U.
$UC$	-	Tensão retificada (constante) de saída do S.M.U. corrigida pela temperatura
$\bar{U}$	-	Valor médio de tensão retificada (constante) de saída do S.M.U.
$U_e$	-	Sinal de tensão de entrada (alternada)
$U_s$	-	Sinal de tensão de saída (alternada)
$\dot{U}_s$	-	Derivada primeira do sinal de tensão de saída (alternada)
$U_{vazio}$	-	Sinal de tensão de saída do S.M.U. para quando estiver sem sementes (tensão em vazio)
$V$	-	Unidade de tensão elétrica em Volts
$Vca$	-	Unidade de tensão elétrica em Volts para tensão alternada
$Vcc$	-	Unidade de tensão elétrica em Volts para tensão contínua
$\epsilon_m$	-	Permissividade do meio dielétrico
$\epsilon_o$	-	Permissividade do vácuo, constante universal de valor $8,85 \cdot 10^{-12} F/m$
$\epsilon$	-	Permissividade elétrica complexa relativa ao espaço vazio (ou simplesmente permissividade relativa ou ainda constante dielétrica)
$\epsilon'$	-	Permissividade elétrica relativa ao espaço vazio (magnitude do número complexo $\epsilon$ )
$\epsilon''$	-	Fator de perda dielétrica (ângulo de fase do número complexo $\epsilon$ )
$\epsilon_\infty$	-	Permissividade a frequências altas o suficiente para que a orientação molecular não contribua com a polarização
$\epsilon_s$	-	Permissividade estática
$\phi$	-	Ângulo de fase
$\rho$	-	Densidade volumétrica de uma mistura ar-grão
$\tau$	-	Tempo de relaxação
$\omega$	-	Frequência do campo elétrico alternado (em rad/s)
$\xi$	-	Função calibração independente da densidade
$\zeta$	-	Porcentagem fracionada de teor de água (decimal)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1	Classificação dos métodos de medição de umidade de sementes . . . . .	5
2.2	O princípio capacitivo: conceitos e definições . . . . .	8
2.2.1	A capacitância . . . . .	8
2.2.2	A polarização . . . . .	10
2.2.3	A frequência de relaxação . . . . .	11
2.2.4	A permissividade elétrica complexa relativa $\epsilon$ . . . . .	13
2.3	A água em sementes: formas, forças e o fenômeno da sorção . . . . .	14
2.4	Natureza da variação das propriedades dielétricas de sementes . . . . .	17
2.4.1	Dependência do teor de umidade . . . . .	17
2.4.2	Dependência da frequência . . . . .	22
2.4.3	Dependência da temperatura . . . . .	27
2.4.4	Dependência da densidade volumétrica da mistura ar-grão . . . . .	28
2.5	O Sensor Capacitivo: características construtivas . . . . .	33
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE UMIDADE (S.M.U.)</b>	<b>43</b>
3.1	Requisitos de Construção . . . . .	43
3.2	O Sistema de Medição de Umidade (S.M.U.) . . . . .	44
3.3	Construção Mecânica do Sensor (Cuba Sensora) . . . . .	46
3.4	Circuito Elétrico e sua Função de Transferência . . . . .	48
3.4.1	Determinação da frequência de trabalho do circuito . . . . .	53

3.4.2	Simulação da resposta em frequência para o circuito utilizado . . . . .	54
3.4.3	Resposta em frequência do sensor para milho seco e milho úmido . . . . .	58
3.4.4	Síntese dos resultados obtidos . . . . .	62
3.5	Construção do circuito eletrônico do sensor . . . . .	62
3.6	Módulos do S.M.U. e testes preliminares . . . . .	65
3.6.1	Escolha dos módulos constituintes do S.M.U. . . . .	65
3.6.2	Aferição da placa A/D do Controlador Lógico Programável . . . . .	66
3.6.3	Determinação da tensão $U_{vazio}$ para sensor vazio . . . . .	68
<b>4</b>	<b>CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE</b>	<b>69</b>
4.1	Estudo da influência da temperatura e densidade de uma amostra de sementes sobre a tensão de saída $U$ do sensor de umidade . . . . .	69
4.2	Pré-teste para determinação da metodologia de umidificação das amostras de sementes . . . . .	74
4.3	Procedimento experimental para umidificação das sementes através do embebi-mento com água . . . . .	77
4.4	Procedimento experimental para calibração e resultados alcançados . . . . .	78
4.4.1	Calibração à temperatura $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . . . . .	80
4.4.2	Determinação da variação de $U$ para a faixa de temperatura de $10$ a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . . . . .	82
4.5	Discussão sobre os resultados obtidos do procedimento de calibração do sensor de umidade . . . . .	85
4.5.1	Calibração à temperatura $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . . . . .	86
4.5.2	Efeito da temperatura na calibração a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . . . . .	92
4.5.3	Efeito da densidade (variação do $P_{ap}$ ) na calibração a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . . . . .	93
4.6	Implementação do programa de controle do S.M.U. . . . .	96
4.6.1	Correção automática de $U$ em função da temperatura . . . . .	96
4.6.2	Seleção da curva de calibração . . . . .	99
4.7	Atendimento aos Requisitos de Construção . . . . .	99
4.8	Constatações principais . . . . .	102

<b>5</b>	<b>AFERIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE UMIDADE (S.M.U.)</b>	<b>105</b>
5.1	Procedimento Experimental . . . . .	105
5.2	Resultados . . . . .	107
5.3	Discussão sobre os erros observados na aferição . . . . .	109
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>115</b>
6.1	Conclusões . . . . .	115
6.2	Trabalhos futuros . . . . .	116
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>119</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICES E ANEXOS</b>	<b>125</b>
8.1	APÊNDICE I - TABELAS . . . . .	125
8.2	APÊNDICE II - EQUAÇÕES DE REGRESSÃO . . . . .	130
8.3	APÊNDICE III - PROGRAMAS EM MATLAB . . . . .	131
8.4	ANEXO I - PROGRAMA <i>LADDER</i> DE CONTROLE DO S.M.U.	149





# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

O Brasil tem-se destacado internacionalmente como grande produtor e exportador de grãos. Essa posição tem-se firmado a cada ano pela alta competitividade do país nesta área. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), o País produziu, na safra 2007/2008, aproximadamente 60,0 milhões de toneladas de soja e 58,6 milhões de toneladas de milho, as duas principais culturas em produção de grãos. Segundo o Instituto de Economia Agrícola (IEA), em 2004, o Brasil era o quarto exportador mundial de milho, com três milhões de toneladas exportadas, figurando na quarta posição entre os países exportadores, atrás de Estados Unidos, Argentina e China.

A cultura do milho (*Zea mays L.*) ocupa lugar de destaque na produção mundial, não só devido ao grande valor econômico, mas também em razão do acúmulo de conhecimentos científicos relacionados com esta espécie e do imenso potencial que ela apresenta. No Brasil, as condições edafo-climáticas são diversificadas e muito favoráveis à cultura do milho que, associadas à grande disponibilidade de terras cultiváveis, têm atraído grandes empresas de pesquisa e produção de sementes.

Todas essas vantagens aliadas ao bom potencial para crescimento da agricultura (principalmente pela disponibilidade de terras cultiváveis) têm atraído grandes empresas de pesquisa de sementes. Entre outras, Dow Agrosiences, Monsanto do Brasil, Nidera Sementes, Pioneer Sementes e Syngenta Seeds são alguns exemplos de multinacionais instaladas no país.

Além destas, tem-se empresas nacionais de pesquisa que estão em atividade há muitos

anos como é o caso da EMBRAPA. Outras, como Sementes Agroceres e Germinal Sementes, foram adquiridas pela Monsanto e Syngenta, respectivamente. Há ainda empresas mais recentes e de menor porte (Biomatrix Sementes, por exemplo) que estão em fase de expansão. Vale ainda destacar um grande número de empresas ligadas a cooperativas de agricultores ou instituições de fomento à pesquisa espalhadas por todo o território nacional como a Coodetec (Paraná), Fundação MS (Mato Grosso do Sul), Fundação MT (Mato Grosso), Fundação Triângulo (Triângulo Mineiro), dentre várias.

Todas estas empresas realizam pesquisa na área de desenvolvimento de novos híbridos de milho e de sorgo, melhoramentos de variedades de soja e outras culturas. Durante o processo de pesquisa e desenvolvimento de produtos, grande número de equipamentos e implementos agrícolas especialmente desenvolvidos para este ramo de atividade são empregados. Pode-se destacar contadores de sementes, debulhadores especiais e semeadoras e colhedoras de parcelas.

Inicialmente, as parcelas eram colhidas manualmente e levadas ao laboratório para análise. Com o constante aumento dos programas de pesquisa, o trabalho manual tornou-se praticamente inviável. A saída passa pela automação de tarefas por meio de instrumentos instalados na própria colhedora. As informações são obtidas durante a colheita de cada parcela e armazenadas em memória digital (via Controlador Lógico Programável), eliminando o trabalho de laboratório.

Este tipo de sistema já existe para aplicação comercial, porém é importado. Os principais fornecedores de sistemas para análise de sementes embarcados em colhedora são norte-americanos e austríacos. O custo destes equipamentos é elevado, o que dificulta sua aquisição por empresas instaladas no país. Sem esta tecnologia, as empresas têm limitações no processo de desenvolvimento de novos produtos, sendo também um limitador indireto de seu crescimento.

Para o desenvolvimento de um equipamento para aplicação local, o mesmo deveria ser capaz de realizar as seguintes determinações por parcela: massa, massa específica e teor de água. Para atender esta demanda, os sensores e equipamentos envolvidos terão que satisfazer aos requisitos arrolados a seguir:

1. Robustez mecânica (capacidade de resistir a vibrações mecânicas e eventuais choques mecânicos);

2. Rapidez de leitura (para que se torne viável comercialmente);
3. Resistência às intempéries (resistir a altas temperaturas com exposição ao sol, alta umidade do ar em dias chuvosos e exposição à poeira);
4. Simples operação (operado pelo próprio condutor de colhedora);
5. Compatibilidade com um Controlador Lógico Programável (responsável pela automação de todo o processo);
6. Possibilidade de alimentação elétrica 12 V (única fonte de energia presente em uma colhedora);
7. Baixo custo.

O processo de leitura de massa e massa específica tem grau de implementação relativamente fácil através de adequado dispositivo utilizando células de carga disponíveis no mercado. No entanto, para a medição de teor de água um novo sensor teria de ser desenvolvido.

Existe uma grande variedade de sensores de medição de umidade de sementes no mercado nacional (tanto nacionais como importados). No entanto, não são capazes de atender a todos os requisitos arrolados acima. Os sistemas disponíveis não se aplicam para adaptação em campo, principalmente pela fragilidade (condições do campo como choques mecânicos, excesso de temperatura e umidade do ar etc), tempo de leitura de teor de água e dificuldade de adaptação às necessidades de uma colhedora (alimentação elétrica de 12 V, sistema de armazenamento de dados, condições para recepção dos grãos após a trilha, entre outros).

Por outro lado, o material científico publicado sobre este tema aborda mais o estudo das propriedades dielétricas dos diversos produtos agrícolas que o desenvolvimento do sistema de medição propriamente dito. Tais sistemas são melhor abordados em base de patentes, não sendo encontrada uma, no entanto, que tratasse especificamente de medição de umidade em colheita de parcelas para pesquisa de sementes.

A constante evolução dos programas de pesquisa de novos híbridos realizados por empresas públicas e privadas, a demanda por sistemas de medição de umidade de sementes para avaliação de parcelas embarcado em colhedora e seu alto custo de importação, bem como a ausência de tecnologia nacional nesta área são os fatores que motivaram a realização deste

trabalho e denotam sua importância. Deste modo, almeja-se o desenvolvimento de tecnologia de origem nacional de um sistema de medição de umidade, que possa ser embarcado em colhedora, para avaliação de parcelas experimentais.

Como objetivo complementar, procurar-se-á oferecer contribuições para o entendimento do comportamento da constante dielétrica dos produtos agrícolas (especificamente o milho neste trabalho, visto ser a cultura com maior demanda para o tipo de sistema de medição de umidade proposto) com relação a fatores de influência como frequência de aplicação do campo elétrico, temperatura e densidade.

# CAPÍTULO II

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Classificação dos métodos de medição de umidade de sementes

A umidade de grãos é utilizada como importante parâmetro no manejo de produtos agrícolas, principalmente nas etapas de colheita e pós-colheita. Prova de tal importância é a ampla variedade de medidores de umidade de grãos disponíveis no mercado, tanto importados quanto nacionais. Nelson et al (2000) destacam alguns exemplos de utilização deste parâmetro:

- Avaliação do momento ideal para colheita mecanizada. A regulagem da colhedora é função, dentre outros fatores, da umidade dos grãos a serem colhidos;
- Condição para armazenagem de grãos. A armazenagem deve ser feita com umidade controlada para evitar o aparecimento de fungos ou germinação indesejada;
- Fator importante na determinação do valor de mercado dos grãos. Grãos úmidos necessitam passar por processo de secagem para posterior armazenagem. Este processo tem seu custo que deve ser levado em conta por compradores de grão úmido;
- Importante informação para um eficiente processamento de grãos para fabricação de farinhas e produtos para alimentação animal. As máquinas de processamento de grãos são projetadas para trabalhar eficientemente em uma faixa adequada de umidade dos grãos.

Nelson, Lawrence e Kandala (1993) acrescentam que o teor de umidade também é importante no momento da venda dos grãos. Como são vendidos proporcionalmente à massa, é vantagem para o vendedor um teor de umidade tão alto quanto o permitido, ao passo que para o comprador será mais vantajoso um teor de umidade tão baixo quanto possível.

Diante de tal importância, vários métodos de determinação de umidade foram desenvolvidos. Cada método aplica-se melhor a determinada necessidade. Quando faz-se necessário resultados exatos, utiliza-se métodos diretos como o método de estufa. Estes métodos, entretanto, são demorados, não se aplicando, por exemplo, a uma linha de produção. Neste caso, tem-se à disposição outros métodos que oferecem resultados em segundos. É o caso dos medidores de umidade baseados na determinação das propriedades elétricas dos grãos. São, contudo, mais adequados quando se quer uma análise mais qualitativa que quantitativa, ou quando a precisão dos resultados não é fator primordial.

Carvalho (1994) divide tais métodos em primários ou diretos, pelos quais se remove e se quantifica (por massa ou volume) a água contida na semente, e secundários ou indiretos, nos quais se mede alguma característica da semente que, de alguma forma, se relaciona com seu teor de água. Na primeira categoria tem-se a secagem em estufa e cálculo da massa perdida, remoção de água por destilação e medida do volume representado pela água, extração de água com um solvente e determinação da quantidade de água através de processos cromatográficos ou espectrofotométricos. Dentre os métodos secundários como higrometria, espectroscopia de luz infravermelha ou de microondas, ressonância nuclear magnética e reações químicas, destacam-se os baseados em propriedades elétricas das sementes.

No Brasil, o Ministério da Agricultura selecionou o método de estufa (método direto) como método padrão de medição de umidade (Brasil, 1992). Desta forma, garante-se que os resultados obtidos nos diversos laboratórios sejam uniformes e comparáveis entre si. É um método que possui rigorosa e bem definida metodologia, podendo, porém, durar mais de 24 horas.

Nelson et al (2000) ressaltam, entretanto, que métodos como o citado anteriormente são muito demorados para uso comercial, sendo necessário recorrer a outros já desenvolvidos. Dos medidores de umidade modernos que oferecem resultados rápidos, Nelson et al (2000) relatam que a maioria trabalha com a leitura de propriedades elétricas de grãos. Tais propriedades são altamente correlacionadas com a porcentagem de umidade.

Carvalho (1994) complementa que os métodos baseados em propriedades elétricas das sementes atingiram grande popularidade em virtude da rapidez e facilidade com que são executados, ainda que não sejam muito exatos. São métodos baseados na medição da condutividade ou da capacitância das sementes de uma amostra, sendo a capacitância uma propriedade de maior acurácia do que a condutividade em virtude de não medir apenas a água existente na superfície da semente.

Knöchel, Daschner e Tautel (2001), em seu estudo sobre o desenvolvimento de um sensor para medida instantânea do teor de umidade em gêneros alimentícios, reporta que a determinação *on-line* de umidade tem ganhado importância em função do uso de métodos de produção cada vez mais rápidos. Instrumentos demorados de determinação de umidade (mesmo que exatos, como Karl Fischer), mostram-se inadequados para o controle de qualidade em uma linha de produção. Destaca ainda que, mesmo não sendo usados para fins regulatórios, existe a necessidade de desenvolvimento de instrumentação que permita rápida determinação de umidade no local de produção.

Knöchel, Daschner e Tautel (2001) enumeram alguns métodos indiretos para medição de umidade em alimentos com aplicação *on-line*:

- Medidor de umidade radiométrico;
- Sensores resistivos;
- Sensores capacitivos a altas frequências;
- Sensor de ressonância magnética nuclear;
- Sensores ópticos.

Outro método indireto que tem sido estudado para medições *on-line* é o de emissão acústica. Amoodeh, Khoshtaghaza e Minaei (2006), em seu trabalho *Acoustic on-line grain moisture meter*, projetaram e desenvolveram o protótipo de um sensor de umidade acústico. Caracteriza-se pela queda de grãos em uma superfície plana e inclinada. Um microfone instalado abaixo da mesma, capta o som gerado pelo impacto dos grãos e o converte em um sinal elétrico. Concluíram que tal sensor é eficaz na leitura de umidade do trigo dentro da faixa típica desta cultura. No entanto, a sensibilidade e precisão do sensor são afetadas tanto pelo tipo de material

de que é feita a superfície do sensor como pela altura de queda das sementes. Também é sensível às diversas variedades de trigo, sendo necessária uma calibração diferente para cada variedade.

Carvalho (1994) destaca ainda a estufa de microondas que, apesar de não se encaixar como método indireto, é capaz de oferecer resultados em poucos minutos.

Existem outros métodos de medição de umidade, com princípios físicos diversos, que não foram citados. Contudo, eles podem ser separados em uma das duas classes discutidas: métodos primários ou diretos e métodos secundários ou indiretos.

## **2.2 O princípio capacitivo: conceitos e definições**

De interesse deste trabalho, o método indireto de medição de umidade via princípio capacitivo será discutido mais detalhadamente.

### *2.2.1 A capacitância*

Sensores capacitivos são largamente utilizados na indústria e em laboratórios para medição de diversos sinais físicos. Sensores de posição, velocidade angular, nível de líquido, umidade, aceleração e pressão são alguns exemplos. Tais sensores são construídos de modo que a variação do parâmetro a ser medido cause uma mudança do valor de capacitância do sensor (PREETHICHANDRA e SHIDA, 2001 e BRACKE *ET AL*, 2005).

Essa mudança do valor de capacitância pode se dar em função de mudança das características geométricas do capacitor ou da mudança do dielétrico utilizado. Segundo Callister (2003), um material dielétrico (ou simplesmente dieleto) é aquele que, sendo um isolante elétrico, exhibe estrutura de dipolos elétricos. Assim, existe uma separação de cargas positivas e negativas no material a nível molecular ou atômico. A interação entre os dipolos elétricos do material dielétrico com o campo elétrico aplicado a ele produz variações que, em um capacitor, resulta na variação de capacitância.

Quando uma tensão é aplicada sobre um capacitor, uma placa torna-se carregada positivamente e a outra negativamente, com o campo elétrico correspondente dirigido de positivo para negativo (Fig. 2.1). A capacitância  $C$  é relacionada com a quantidade  $Q$  de cargas presente



nas placas conforme a equação 2.1.

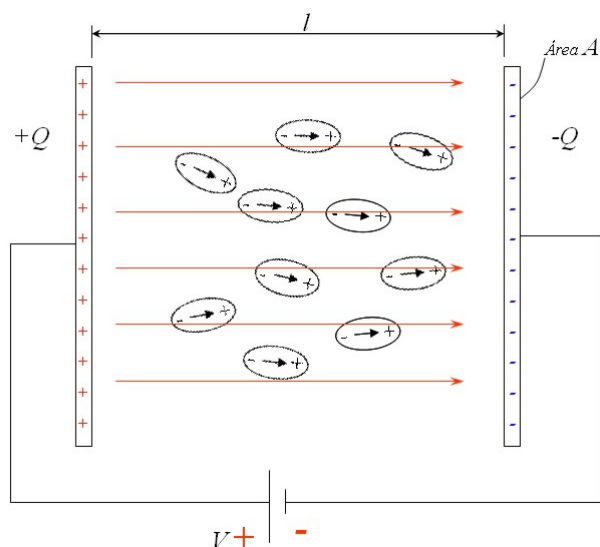


Figura 2.1 – Esquema de um capacitor de placas paralelas

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

onde  $V$  é a tensão aplicada sobre o capacitor. A unidade de capacitância é Coulomb por Volt, ou simplesmente Farad ( $F$ ).

Considerando um capacitor de placas paralelas com vácuo na região entre as placas, sua capacitância pode ser calculada por:

$$C = \epsilon_o \frac{A}{l} \quad (2.2)$$

onde  $A$  representa a área das placas e  $l$  a distância entre elas. O parâmetro  $\epsilon_o$ , chamado de permissividade do vácuo, é uma constante universal tendo valor igual a  $8,85 \cdot 10^{-12} F/m$ .

Se um material dielétrico é inserido na região entre as placas do capacitor tem-se

$$C = \epsilon_m \frac{A}{l} \quad (2.3)$$

onde  $\epsilon_m$  é a permissividade desse meio dielétrico cuja magnitude será maior que  $\epsilon_o$ .

A permissividade relativa  $\epsilon$ , freqüentemente chamada de constante dielétrica, é igual à razão

$$\epsilon = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_o} \quad (2.4)$$

e representa a capacidade de armazenamento de cargas elétricas pela inserção de um meio dielétrico entre as placas de um capacitor (CALLISTER, 2003).

Substituindo 2.4 em 2.3 tem-se

$$C = \epsilon\epsilon_o \frac{A}{l} \quad (2.5)$$

Esta última equação mostra que a capacitância para capacitores de placas 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 dieleto. Também não se deve esquecer que as equações anteriores para cálculo de capacitâncias somente são válidas, a rigor, para capacitores de placas infinitas, de modo que as distorções das linhas de força nas bordas do capacitor não existam. No entanto, estas fórmulas podem fornecer boa aproximação quando os valores de  $l$  são suficientemente pequenos em relação às áreas das placas, minimizando o efeito das distorções nas bordas.

A constante dielétrica é uma propriedade do material de importância fundamental para projeto de capacitores. Para exemplificar, a Tab. 2.1 apresenta os valores de  $\epsilon$  para alguns materiais (valores extraídos de Halliday e Resnick (1981)).

### 2.2.2 A polarização

Qualquer dipolo elétrico submetido a um campo elétrico tenderá a se alinhar na direção deste campo. Ao processo de alinhamento do dipolo dá-se o nome de polarização (CALLISTER, 2003). Três tipos de polarização são citados por Callister (2003), sendo:

- Polarização eletrônica - Pode ser induzida em maior ou menor grau em todos os átomos. Resulta do deslocamento do centro de cargas negativas da nuvem eletrônica de um átomo em relação ao centro de cargas positivas do núcleo deste mesmo átomo. Este deslocamento é induzido por um campo elétrico. Este tipo de polarização é encontrado em todos os materiais dielétricos e, é claro, existe apenas enquanto o campo elétrico está presente.

Tabela 2.1 – Constante dielétrica de alguns materiais. Propriedades válidas à temperatura ambiente e em condições tais que o campo elétrico não varia com o tempo. (HALLIDAY E RESNICK, 1981).

<b>Dieletro</b>	$\epsilon$
Vácuo	1,00000
Ar	1,00054
Água	78
Papel	3,5
Mica	5,4
Âmbar	2,7
Porcelana	6,5
Quartzo Fundido	3,8
Vidro Pyrex	4,5
Baquelite	4,8
Polietileno	2,3
Poliestireno	2,6
Teflon	2,1
Neoprene	6,9
Óleo Piranol	4,5
Bióxido de Titânio	100

- Polarização iônica - Ocorre somente em materiais que são iônicos. Um campo elétrico age no sentido de deslocar cátions em uma direção e ânions na direção oposta.
- Polarização por orientação - Encontrada apenas em substâncias que possuem dipolos permanentes. Resulta da rotação dos dipolos na direção do campo elétrico aplicado.

Em um material dielétrico podem ocorrer os três tipos citados de polarização, sendo a contribuição de cada tipo máxima, ou até mesmo nula, dependendo do tipo de material utilizado. Assim, como exemplo, a polarização iônica terá contribuição nula em materiais que apresentam ligação covalente, visto que não apresentam íons.

### 2.2.3 A frequência de relaxação

São comuns situações em que se tem uma tensão alternada aplicada a capacitores. Nestas condições, um material dielétrico apresenta características novas, conforme é mencionado por Callister (2003) e comentado a seguir.

Considere um dieletro submetido a um campo elétrico alternado. A cada mudança de

direção deste campo elétrico, os dipolos presentes no material se reorientam em conformidade com a direção imposta pelo campo. Entretanto, o tempo para esta reorientação é finito e diferente para cada dieleto e tipo de polarização. Assim, existe um tempo mínimo de reorientação que depende da "facilidade" com que cada dipolo do dieleto é capaz de se realinhar. À frequência correspondente ao tempo mínimo necessário para que ocorra a reorientação dos dipolos de um material dielétrico submetido a um campo elétrico alternado dá-se o nome de **frequência de relaxação** (CALLISTER, 2003).

Um dipolo não consegue manter sua mudança de orientação quando um campo elétrico alternado excede a frequência de relaxação. Deste modo, este dipolo deixa de contribuir para a composição da constante dielétrica  $\epsilon$ . Esta contribuição é melhor visualizada através da Fig. 2.2, que representa esquematicamente a relação existente entre a constante dielétrica  $\epsilon$  e a frequência imposta por um campo elétrico alternado. Quando um mecanismo de polarização cessa de funcionar (devido a frequência de relaxação para aquele mecanismo ter sido atingida), ocorre uma queda abrupta do valor da constante dielétrica.

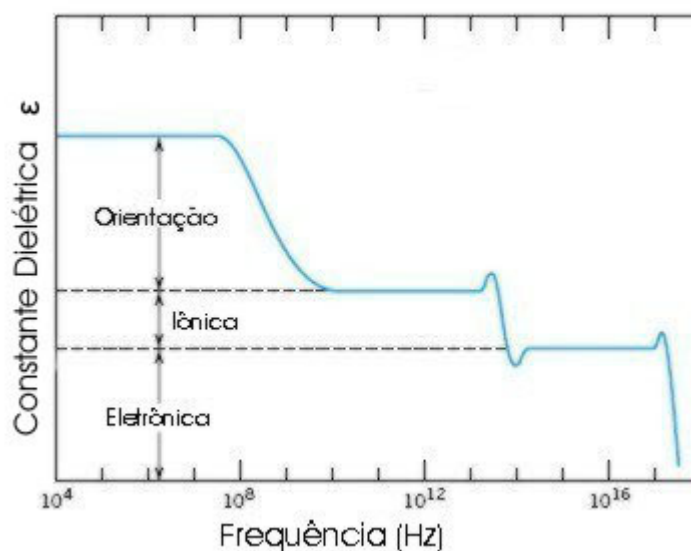


Figura 2.2 – Variação da constante dielétrica com a frequência de um campo elétrico alternado. (CALLISTER, 2003)

#### 2.2.4 A permissividade elétrica complexa relativa $\epsilon$

A constante dielétrica  $\epsilon$  definida no item 2.2.1 refere-se a um capacitor submetido a um campo elétrico que não muda de direção e sentido com o tempo. Para campos elétricos alternados,  $\epsilon$  assume novos comportamentos físicos, sendo estudado sob a forma de um número complexo.

Nelson et al (2000) definem  $\epsilon$  como sendo a permissividade complexa relativa ao espaço vazio, ou, simplesmente, constante dielétrica complexa. Ela é dada pela seguinte equação:

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (2.6)$$

onde

- $\epsilon$  representa a permissividade complexa relativa ao espaço vazio ou constante dielétrica complexa (equivalente ao  $\epsilon$  definido no item 2.2.1),
- $\epsilon'$  permissividade elétrica relativa ao espaço vazio,
- $\epsilon''$  fator de perda dielétrica.

Berbert e Stenning (1997) explicam as propriedades descritas anteriormente da seguinte maneira:

*"A permissividade elétrica relativa  $\epsilon'$  de determinado material representa sua capacidade de armazenar parte da energia do campo elétrico, ao passo que o fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  está associado à quantidade de energia dissipada pelo dielétrico quando submetido a um circuito de corrente alternada".*

O valor de permissividade complexa relativa depende do teor de umidade, da frequência, temperatura, da massa específica aparente, bem como da estrutura e composição química do dieletro, sendo frequentemente utilizada para caracterização de materiais.

Isso é particularmente aplicável em materiais particulados higroscópicos como solos e grãos, onde  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  são altamente correlacionados com a porcentagem de umidade. Pode-se exemplificar uma aplicação prática dessas propriedades através do trabalho desenvolvido por

Kizito et al (2008). Em seu recente estudo sobre medidores de umidade capacitivos para solo, é feita uma análise sobre a influência da frequência, condutividade elétrica e temperatura na calibração de um sensor de umidade.

Na área de sementes, pelo fato da constante dielétrica complexa dos grãos também ser altamente correlacionada com seu teor de água, vários medidores de umidade eletrônicos (cujos recipientes de amostras são de placas paralelas ou coaxiais) têm sido desenvolvidos (NELSON ET AL, 2000).

A mudança da capacitância do recipiente (sensor) está diretamente relacionada com a constante dielétrica da amostra de grãos colocada no sensor. Tal mudança de capacitância fornece, portanto, um meio de se determinar (indiretamente) a porcentagem de umidade da amostra de grãos.

### **2.3 A água em sementes: formas, forças e o fenômeno da sorção**

A água desempenha papel básico no processo de germinação, razão pela qual uma semente, cujo tegumento não apresente qualquer tipo de impedimento, procura absorver água do meio ambiente (CARVALHO, 1994). As sementes que se encontram com teor de água na faixa recomendada para o armazenamento (entre 11 e 13%) absorvem água rapidamente em virtude do baixo potencial de água que apresentam. Ao entrar na semente, a água estabelece ligação com as macromoléculas das partículas coloidais dispersas, ligação essa que se faz de diferentes formas em função do nível em que se estabelece e nas quais agem diferentes tipos de forças.

Trabelsi e Nelson (2004) classificam a água presente dentro de sementes em duas categorias: "água livre" e "água presa" (em inglês, "bound water", isto é, água ligada a macromoléculas na semente, conforme definido por Carvalho (1994)). Do ponto de vista elétrico, a água líquida livre é bem descrita pelo modelo dielétrico de Debye (este modelo é detalhado no item 2.4.2). No entanto, pouco ainda se conhece sobre as propriedades dielétricas da "água presa".

Em materiais granulares como cereais e sementes oleaginosas, se espera vários modos de ligação da "água presa" às macromoléculas das sementes, dependendo da estrutura própria de cada tipo de semente, da quantidade de água disponível e da natureza das moléculas presentes.

Carvalho (1994) faz uma breve revisão bibliográfica sobre como a água se liga quimi-

camente dentro de uma semente. Assim, os parágrafos seguintes dedicam-se a informar sobre o comportamento da água dentro da semente para melhor compreensão do comportamento dielétrico da mesma.

Existem, na semente, pelo menos três tipos de "água presa". Tais tipos são definidos pela força (intensidade e tipo da força) com que a água se encontra ligada à superfície de macromoléculas. Esses tipos são os seguintes:

1. Tipo 1: nesse caso, a água está quimicamente unida às macromoléculas através de ligações iônicas, num processo ao qual os autores dão o nome de "quimisorção". Trata-se de uma ligação muito forte em que a água age como um "ligand" (um grupo, íon, ou molécula ligada ao átomo central de um grupo de coordenação) e não como solvente;
2. Tipo 2: esse é o tipo de água que se condensa sobre sítios hidrofílicos de macromoléculas. É a partir desse tipo que a água passa a ter um papel de solvente e as propriedades que apresenta são muito semelhantes às de seu estado livre. A energia de ligação do tipo 2 é, evidentemente, bem menor do que a do tipo 1;
3. Tipo 3: nesse tipo de união, a água estabelece "pontes" sobre sítios hidrofóbicos de macromoléculas, sendo esse o tipo mais fraco de união, apresentando, a água, as mesmas propriedades que quando em estado livre, ainda que alguns poucos parâmetros termodinâmicos mostrem alguma variação.

Estes três tipos de "água presa" representam um grau mais profundo de união, de sorte que as propriedades da molécula do produto absorvente e as da água interagem. O resultado final é que, quando unidas, ambas as moléculas se modificam, ficando diferentes de seus estados originais. Essa interação entre as duas substâncias (água e macromoléculas do sistema coloidal) recebe o nome geral de **sorção** e resulta tanto da entrada (**adsorção**) como da saída (**desorção**) de água da semente.

A designação geral de **água adsorvida** (referente à "água presa") difere-se de **água absorvida**. Nesta, as ligações são mais fracas estando focalizadas nos espaços intergranulares e dentro dos poros do material. Na água **absorvida** atuam apenas forças capilares. A união água-semente seria tão fraca que a água, nessa condição, manteria todas as suas propriedades do

estado livre. Nesse tipo de união, as moléculas do adsorvente funcionam apenas como estrutura de suporte.

Carvalho (1994) também cita autores que sugerem as faixas de umidade com que a água se liga de diferentes maneiras. A "água presa" compreenderia teores entre zero e aproximadamente 27%. De 0 a 5% a água se encontraria como uma só camada de moléculas em torno das partículas coloidais, tratando-se de uma união muito forte, difícil de ser desfeita. Entre 5 e 13%, a água se encontraria no que o autor chama de camada polimolecular, ou seja, é uma camada que resulta da deposição de moléculas de água sobre moléculas de água. Acima de 13% (até 27%), a água que se prende à semente estaria em forma líquida, sob tensão osmótica. Acima de 27%, ter-se-ia a água livre.

As forças intermoleculares, também conhecidas como forças de *Van der Waals*, são as responsáveis pelo fenômeno da adsorção. Segundo teorias correntes, essas forças teriam as seguintes origens:

- **Efeito de orientação de dipolos permanentes ou efeito Keeson** Segundo essa teoria, as forças intermoleculares surgiriam em razão de que a estrutura molecular de certas substâncias apresenta os centros de gravidade da carga positiva e da carga negativa não coincidentes. Esse distanciamento entre os dois centros de gravidade resultaria em um momento dipolar permanente, ou seja, em uma certa "sobra de energia". A água, o álcool e a amônia são bons exemplos de substâncias com momento dipolar constante.
- **Efeito de momento dipolar induzido ou efeito de Debye** Esse é o caso em que as moléculas da substância considerada apresentam coincidência entre os centros de gravidade das cargas negativa e positiva. Essa estabilidade da molécula, contudo, é relativamente fraca e pode ser rompida facilmente quando essa molécula é colocada junto a uma outra que tenha um forte momento dipolar ou próxima de um íon ou de um campo elétrico. Nessa condição, a molécula, anteriormente estável, apresenta uma separação entre os centros de gravidade de suas cargas positiva e negativa, adquirindo um momento dipolar (induzido) e passando a apresentar, portanto, condições de realizar uma união do tipo adsorção.
- **Efeito de dispersão London** Segundo essa teoria, o átomo de hidrogênio, representado por um núcleo ao redor do qual vibra incessantemente um elétron, possui um desequilíbrio



energético devido a assimetria da posição do único elétron. Ao se aproximarem dois átomos de hidrogênio, se os elétrons começarem a girar em fase (ocupando os mesmos pontos relativos ao núcleo no mesmo momento), isso pode criar uma corrente de força; essa corrente de força - avança a teoria - pode funcionar como indutora de momento dipolar em moléculas vizinhas e, portanto, propiciar uma união do tipo adsorção.

## 2.4 Natureza da variação das propriedades dielétricas de sementes

As propriedades dielétricas de um material qualquer variam em função de vários fatores. Nelson (1991) enumera os principais fatores que influenciam tais propriedades:

- porcentagem de umidade presente no material;
- frequência do campo elétrico alternado aplicado e
- temperatura do material analisado e sua densidade e estrutura.

Além disso, em materiais granulados (ou particulados) a densidade volumétrica da mistura ar-partícula é outro fator que influencia as propriedades dielétricas. Destaca ainda que fatores como composição química e molecular de grãos e sementes devem ser considerados. No entanto, em materiais higroscópicos (como a maioria dos produtos agrícolas), a porcentagem de umidade presente no material é geralmente o fator dominante.

### 2.4.1 Dependência do teor de umidade

As propriedades dielétricas da maioria dos materiais biológicos são altamente dependentes do seu teor de umidade. Esta influência deve-se ao valor relativamente elevado do  $\epsilon'$  da água em relação ao  $\epsilon'$  da matéria seca (grãos secos). A título de comparação, o  $\epsilon'$  da água pura, exposta à rádio frequência, é da ordem de 80, enquanto que para o trigo, a 12 % de umidade, 1 MHz de frequência, tem-se, aproximadamente, 4,5 (BERBERT e STENNING, 1997).

Em seu estudo sobre a influência do teor de umidade nas propriedades dielétricas de sementes de trigo no intervalo de 500 kHz a 5 MHz, Berbert e Stenning (1997) encontraram

uma variação linear de  $\epsilon'$  com o teor de umidade (%b.u.) do trigo quando submetido a uma frequência de 5,0 MHz. Para frequências mais baixas (0,5 e 1,0 MHz), existe um valor crítico de umidade (14%) acima do qual a taxa de variação de  $\epsilon'$  eleva-se acentuadamente, mostrando um comportamento não-linear (Figura 2.3).

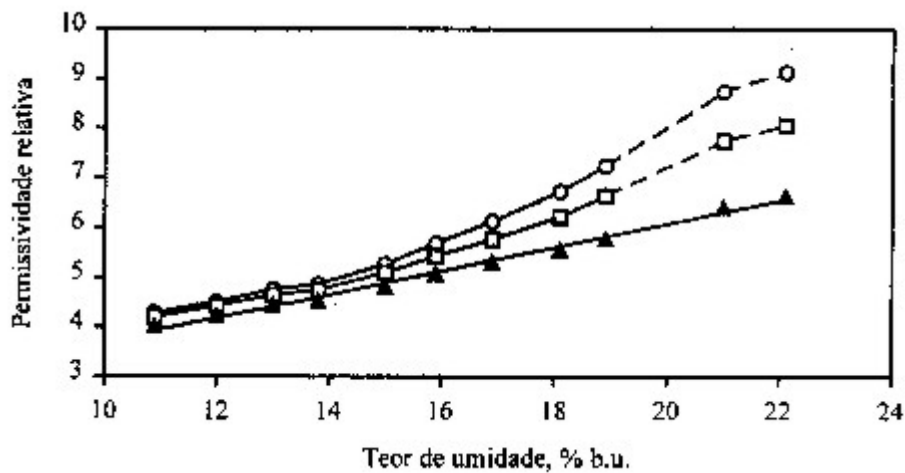


Figura 2.3 – Variação de  $\epsilon'$  com o teor de umidade em função da frequência para o trigo, 21-24 °C: ○ 0,5 MHz; □ 1,0 MHz; △ 5,0 MHz (BERBERT E STENNING, 1997)

Com relação a  $\epsilon''$ , abaixo do ponto crítico de umidade (14 %) o valor de  $\epsilon''$  é praticamente independente da frequência de oscilação do campo e do teor de umidade. Acima de 14 %, tem-se um comportamento não-linear para qualquer valor de frequência (Figura 2.4).

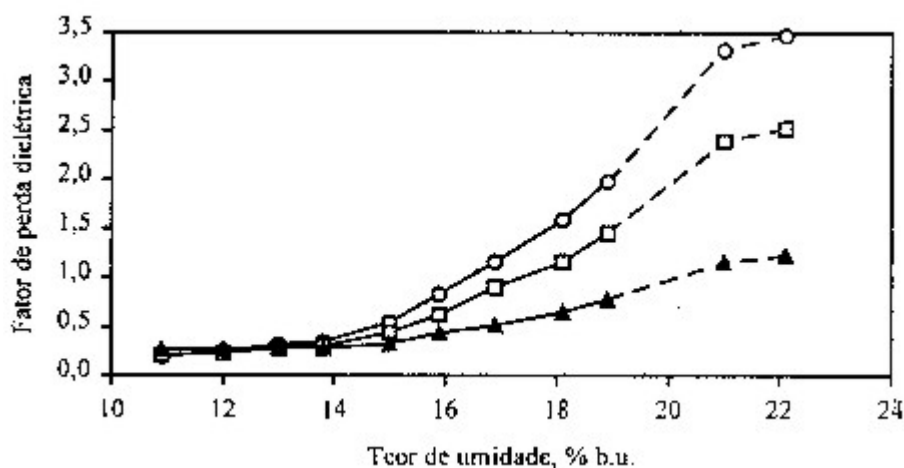


Figura 2.4 – Variação de  $\epsilon''$  com o teor de umidade em função da frequência para o trigo, 21-24 °C: ○ 0,5 MHz; □ 1,0 MHz; △ 5,0 MHz (BERBERT E STENNING, 1997)

Os autores sugeriram que tais comportamentos seriam fruto de variações nas forças de ligação entre as moléculas de água adsorvida e a superfície dos microporos do material estudado,

bem como das forças entre as moléculas de água adsorvida e as moléculas de vapor d'água.

Sacilik, Tarimci e Colak (2006) estudaram a semente de uma planta utilizada no oriente para produção de óleo chamada *safflower*. Determinando as propriedades dielétricas das sementes, encontraram variação linear de  $\epsilon'$  para frequências acima de 5 MHz e comportamento não-linear de  $\epsilon''$  em função do teor de umidade para qualquer frequência estudada (Fig. 2.5 e 2.6)

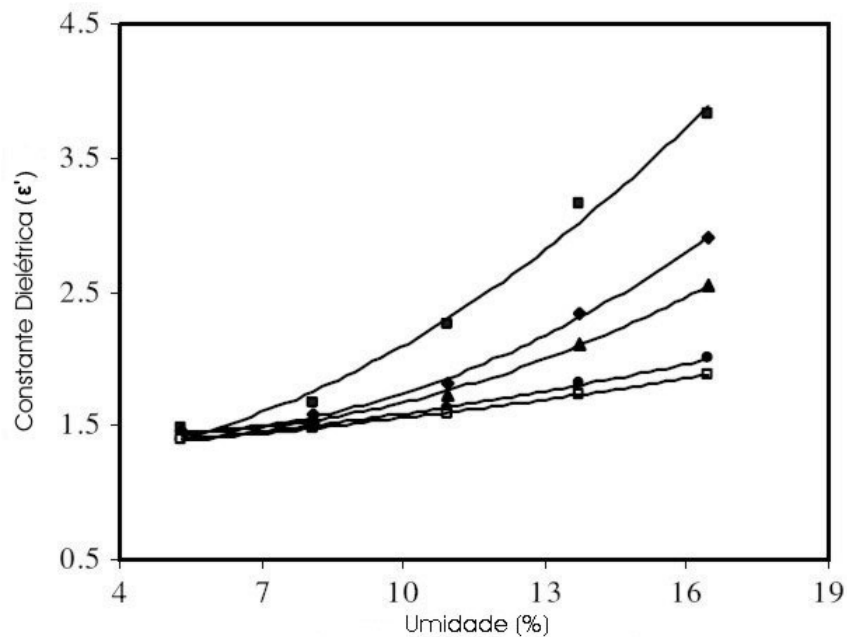


Figura 2.5 – Variação de  $\epsilon'$  com teor de umidade em função da frequência para a semente de *safflower*: □ 100 kHz; ◇ 500 kHz; △ 1 MHz; ○ 5 MHz; ■ 10 MHz (SACILIK, TARIMCI AND COLAK, 2006)

Trabelsi, Krazsewisk e Nelson (1998) definiram  $\xi$  como uma função calibração independente da densidade ( $\rho$ ) dada por:

$$\xi = \frac{\epsilon''}{\epsilon' (a_f \epsilon' - \epsilon'')} \quad (2.7)$$

onde  $a_f$  é o coeficiente angular de uma reta, sendo  $a_f$  função da frequência. Deste modo, para uma frequência fixa, tem-se uma equação que relaciona  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  e que é independente da densidade ( $\rho$ ). De acordo com os dados analisados pelos autores (Fig. 2.7), a raiz quadrada da função  $\xi$  apresentou comportamento linear em função do teor de umidade para o trigo, a 14,2 GHz.

Nelson (1992) ilustra a variação linear de  $\epsilon'$  do arroz com o teor de umidade para frequências da ordem de MHz e GHz (Fig. 2.8).

Berbet et al (2004) encontraram, para o feijão, variação linear tanto de  $\epsilon'$  como de  $\epsilon''$

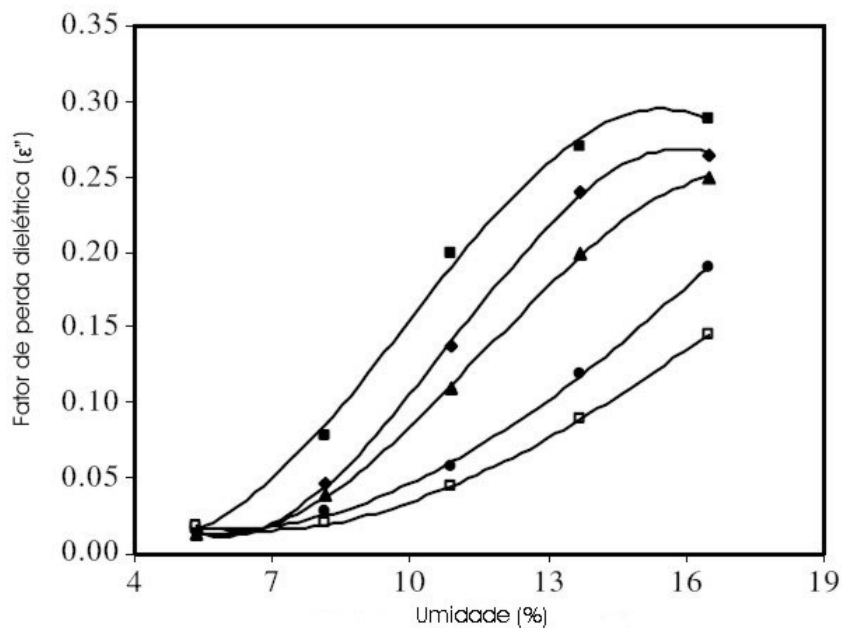


Figura 2.6 – Variação de  $\epsilon''$  com teor de umidade em função da frequência para a semente de *safflower*:  $\blacksquare$  100 kHz;  $\diamond$  500 kHz;  $\triangle$  1 MHz;  $\circ$  5 MHz;  $\square$  10 MHz (SACILIK, TARIMCI AND COLAK, 2006)

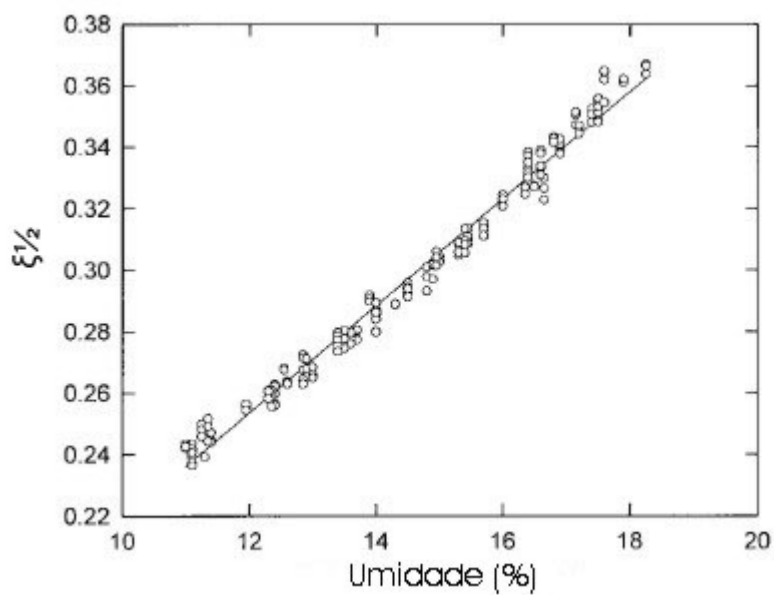


Figura 2.7 – Raiz quadrada da função calibração independente da densidade  $\xi$  para o trigo versus teor de umidade, 14,2 GHz, 24 °C (TRABELSI, KRAZSEWISK E NELSON, 1998)

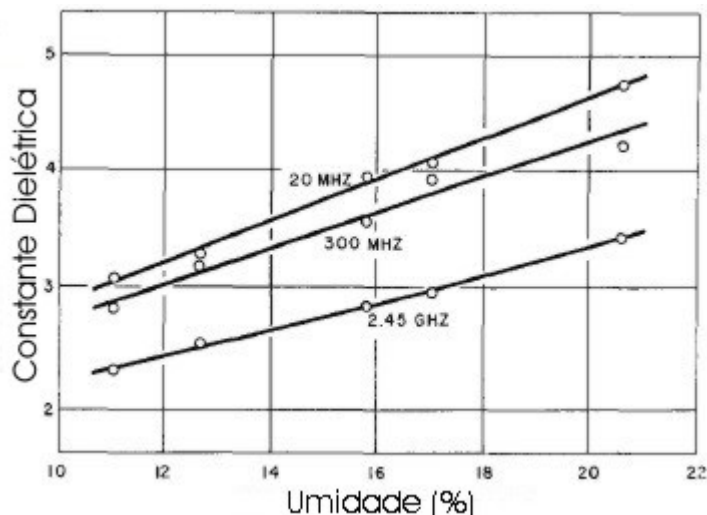


Figura 2.8 – Variação de  $\epsilon'$  com o teor de umidade para o arroz a 24 °C (NELSON, 1992)

em relação ao teor de umidade a 1 MHz de frequência (Fig. 2.9).

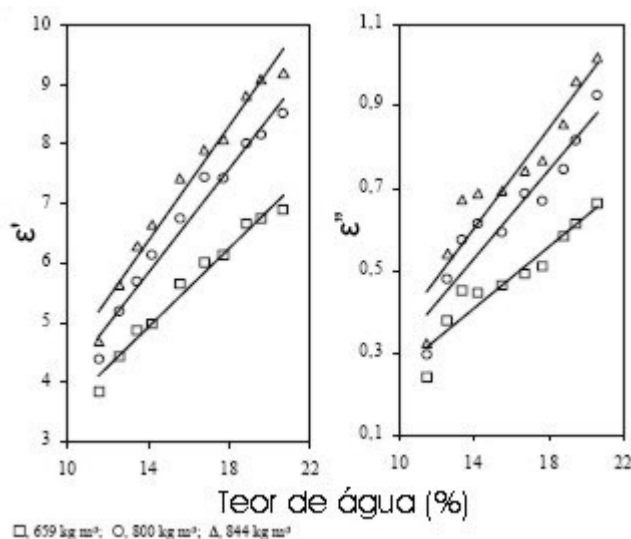


Figura 2.9 – Variação de  $\epsilon'$  com o teor de umidade para o feijão a 20 °C:  $\square$  659  $kg/m^3$ ;  $\circ$  800  $kg/m^3$ ;  $\triangle$  844  $kg/m^3$  (BERBERT ET AL, 2004)

Diante dos dados para trigo, arroz e feijão, pode-se notar uma tendência de linearização da constante dielétrica com relação à variação do teor de umidade quando as frequências aplicadas são da ordem de grandeza de MHz e GHz. Contudo, explicações mais detalhadas sobre o porquê da variação da constante dielétrica com o teor de umidade ainda não foram encontradas. Pode-se apenas supor que seja um fenômeno relacionado a como a água se liga no interior da semente com as várias moléculas ali presentes.

É fato, no entanto, que a porcentagem de umidade presente em sementes é geralmente o fator dominante na dependência das propriedades dielétricas de produtos agrícolas (graças à

notável diferença de  $\epsilon'$  da água pura com relação ao  $\epsilon'$  da matéria seca de sementes, como descrito no início deste item). Esta forte dependência explica o sucesso do uso do princípio capacitivo para medição de umidade em grãos.

#### 2.4.2 Dependência da frequência

Em sistemas capacitivos para medição de umidade, é comum o uso de campo elétrico alternado.

Nelson (1991) destaca um fenômeno importante para a explicação da variação das propriedades dielétricas de um material em função da variação da frequência: a orientação (induzida pelo campo elétrico alternado aplicado) de moléculas que possuem dipolos permanentes.

Debye (1929) *apud* Nelson (1991) desenvolveu a formulação matemática que descreve tal fenômeno para substâncias puras polares:

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau} \quad (2.8)$$

onde

- $\epsilon_{\infty}$  representa a permissividade a frequências altas o suficiente para que a orientação molecular não contribua com a polarização,
- $\epsilon_s$  representa a permissividade estática (valor da permissividade a frequência zero),
- $i$  a constante imaginária de um número complexo,
- $\omega$  a frequência do campo elétrico alternado,
- $\tau$  o tempo de relaxação, período associado ao tempo necessário para que ocorra a reversão das moléculas de orientadas para orientação aleatória quando o campo elétrico é removido.

Separando a equação 2.8 nas partes real e imaginária tem-se:

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2.9)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2.10)$$

Portanto, a valores de freqüências distantes da freqüência de relaxação, a permissividade é constante (de valor  $\epsilon_\infty$  e  $\epsilon_s$ , respectivamente) e perda zero. A freqüências intermediárias, existe uma dispersão. A máxima perda ocorre na freqüência de relaxação dada por  $\omega = \frac{1}{\tau}$ . A Figura 2.10 ilustra graficamente as relações definidas pelas equações 2.9 e 2.10.

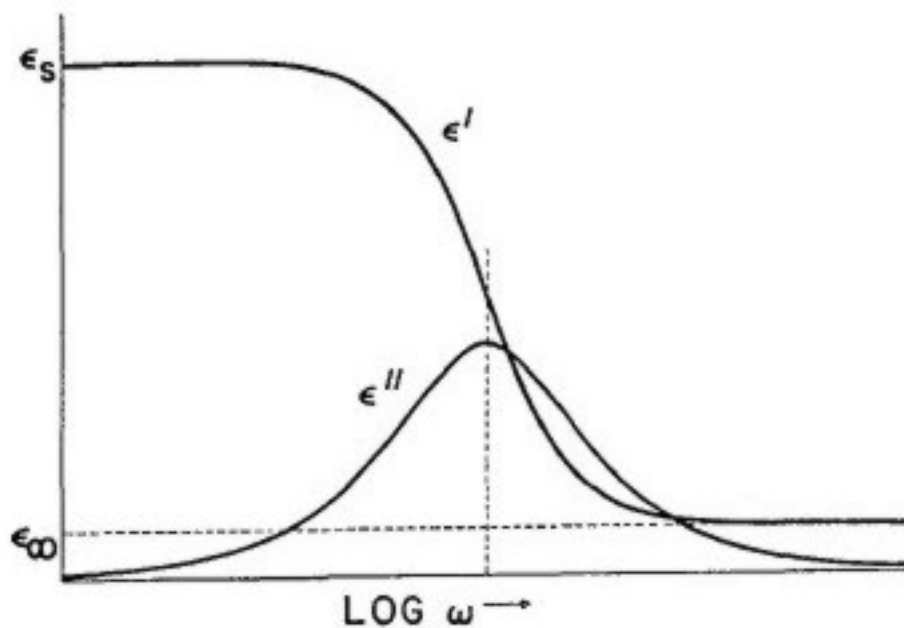


Figura 2.10 – Curva representativa do modelo de Debye para uma substância molecular pura (DEBYE, 1929 APUD NELSON, 1991)

A equação de Debye pode ser representada graficamente em um plano complexo  $\epsilon' \times \epsilon''$  como um semicírculo com domínio limitado pelos valores  $\epsilon_\infty$  e  $\epsilon_s$  (Fig. 2.11). Esta representação é conhecida como diagrama Cole-Cole e ajuda na interpretação das Eq. 2.9 e 2.10. Nos valores extremos de permissividade ( $\epsilon_s$  e  $\epsilon_\infty$ ) não existem perdas (a relaxação é zero). Para valores intermediários de permissividade, as perdas comportam-se em acordo com a Fig. 2.11.

A teoria anterior descreve o comportamento da permissividade de uma substância pura (homogênea) constituída de moléculas polares. Este é o caso da água pura no estado líquido (obtida por destilação, por exemplo). Hasted (1973) apud Nelson (1991) descreve as propriedades dielétricas da água pura submetida a um campo elétrico alternado com freqüências no campo das microondas (Tab. 2.2).

Apesar da água no estado líquido ser um bom exemplo de dielétrico polar puro, ela

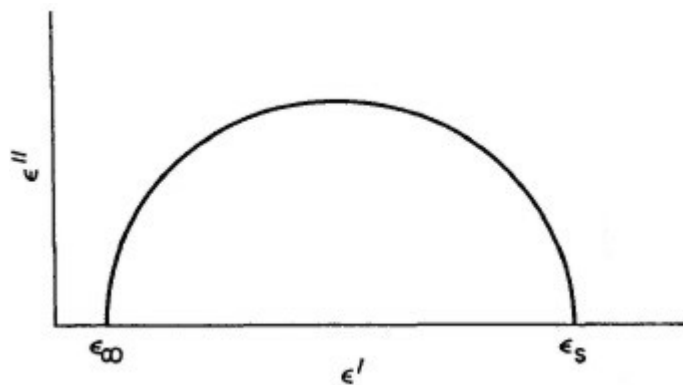


Figura 2.11 – Diagrama Cole-Cole para uma substância polar com tempo de relaxação único (DEBYE, 1929 *apud* NELSON, 1991)

Tabela 2.2 – Propriedades dielétricas da água pura submetida a um campo elétrico alternado (HASTED, 1973 *APUD* NELSON, 1991)

$f$ GHz	20°C		50°C	
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\epsilon'$	$\epsilon''$
0,577	80,3	2,75	69,9	1,25
1,744	79,2	7,9	69,7	3,6
3,00	77,4	13,0	68,4	5,8
4,63	74,0	18,8	68,5	9,4
9,14	63,0	31,5	65,5	16,5
9,37	62,0	32,0	64,5	17,0
12,47	-	-	61,5	21,4
23,62	30,9	35,7	48,3	30,6
24,19	29,6	35,2	48,7	31,1
26,78	-	-	44,2	32,0
34,88	19,2	30,3	35,4	33,1
36,3	-	-	34,3	32,6
890	4,3	2,28	4,3	3,51



aparece muito raramente no estado livre em produtos agrícolas. Geralmente ela é absorvida fisicamente por capilaridade ou está ligada quimicamente com outras moléculas (Nelson, 1991). Além disso, tais produtos (como é o caso dos grãos e sementes) são misturas não homogêneas de diversos arranjos moleculares complexos onde a água liga-se de diferentes formas, com diferentes energias de ligação (ver capítulo 2.3). O resultado de tudo isso é a presença de várias moléculas e compostos com diferentes e desconhecidas propriedades dielétricas em um mesmo material (uma semente de milho, por exemplo).

Portanto, é difícil modelar ou prever o comportamento dielétrico de tais produtos. Entretanto, como salienta Nelson (1991), o completo entendimento de tais propriedades não é necessário para a solução de problemas práticos. Ademais, tal dificuldade não impede o avanço nos estudos experimentais sobre o comportamento dielétrico das sementes.

Neste contexto, Sacilik, Tarimci e Colak (2006) estudaram a variação de  $\epsilon'$  com o aumento da frequência. A uma dada umidade, a constante dielétrica diminui com o aumento da frequência do campo elétrico aplicado. O estudo foi feito para sementes colocadas livremente no sensor (livre) e repetido para as mesmas sementes adensadas no sensor (denso), aumentando assim a densidade de sementes dentro do mesmo. Os resultados estão mostrados na Fig. 2.12. Com relação à variação de  $\epsilon''$  em função da frequência, o comportamento observado foi bem menos regular.

O mesmo comportamento de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  em função da frequência é observado para o trigo em estudo feito por Nelson e Stetson (1976) *apud* Nelson *et al* (2000) (Fig. 2.13).

Avançando no estudo do comportamento das propriedades dielétricas em função da frequência, Trabelsi, Krazsewisk e Nelson (1998) mostram a dependência da função calibração independente da densidade  $\xi$  (como definido na eq. 2.7) com relação à frequência (Fig. 2.14). Observa-se um leve decréscimo de  $\xi$  com o aumento da frequência. Como  $\xi$  é uma função que relaciona  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ , para um sensor projetado para operar em uma única frequência (da ordem de  $GHz$ ), os autores sugerem que a seleção da frequência a ser utilizada deve basear-se em critérios como sensibilidade do sistema, forma e dimensão dos grãos etc.

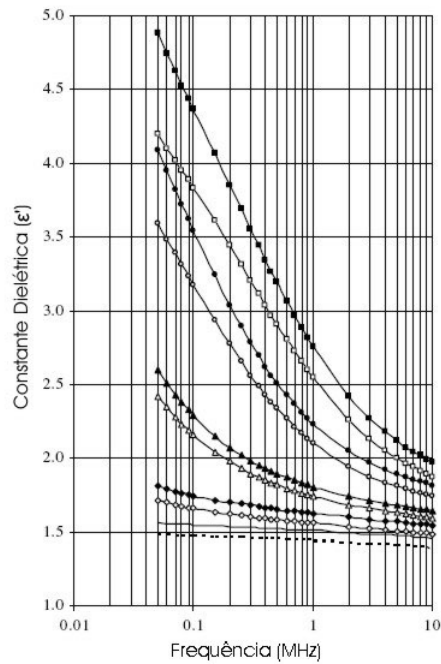


Figura 2.12 – Variação de  $\epsilon'$  com a frequência para a semente de *safflower* (de baixo para cima): 5,33% (denso), 5,33% (livre), 8,12% (denso), 8,12% (livre), 10,91% (denso), 10,91% (livre), 13,70% (denso), 13,70% (livre), 16,48% (denso), 16,48% (livre) (SACILIK, TARIMCI AND COLAK, 2006)

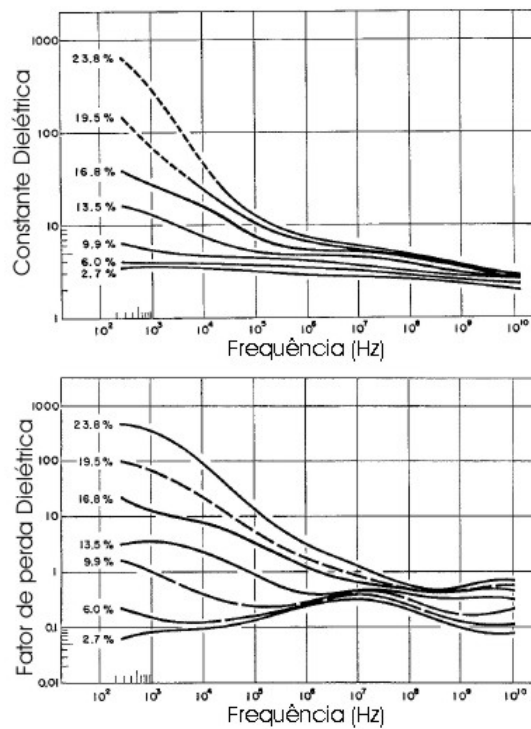


Figura 2.13 – Variação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  com a frequência para o trigo a 24 °C (NELSON AND STETSON, 1976 APUD NELSON ET AL, 2000)

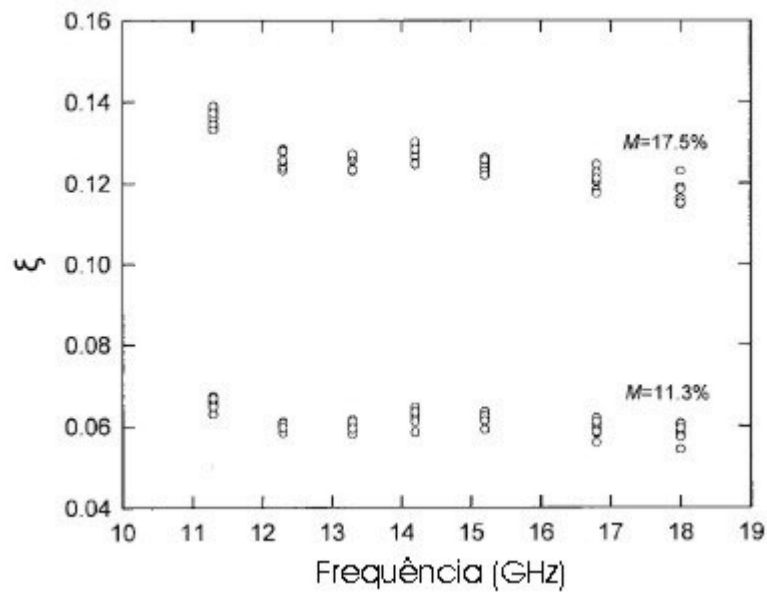


Figura 2.14 – Dependência da frequência em função de  $\xi$  para o trigo, 24 °C (TRABELSI, KRAZSEWISK e NELSON, 1998)

#### 2.4.3 Dependência da temperatura

As propriedades dielétricas de um material também dependem da temperatura. A natureza dessa dependência é função do processo de relaxação dielétrico que acontece sob as condições impostas sob o material (como, por exemplo, a frequência utilizada). Nelson (1991) explica que, com o aumento da temperatura, o tempo de relaxação diminui. Isso implica em um deslocamento do pico de perda (máximo valor de  $\epsilon''$  da Fig. 2.10) para valores de frequência maiores. Portanto, em uma região de dispersão, a permissividade aumentará com o aumento da temperatura enquanto o fator de perda pode aumentar ou diminuir, dependendo do valor da frequência de operação ser maior ou menor que o valor da frequência de relaxação. Para valores  $\epsilon'$  muito altos, sua dependência da temperatura pode ser desprezada.

Trabelsi e Nelson (2004) estudaram o comportamento de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  do trigo em função da temperatura para frequência de 8 GHz (Fig. 2.15). Observa-se o aumento no valor das propriedades dielétricas com o aumento da temperatura para dois teores de umidade distintos. O aumento tem tendência linear até aproximadamente -20 °C quando se apresenta uma maior inclinação para temperaturas posteriores. Para temperaturas superiores a -20 °C, tem-se novamente uma tendência de comportamento linear, com maior inclinação para a amostra com maior teor

de umidade. Os autores comparam este comportamento com o comportamento da água pura, em que, a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , também mostra comportamento similar (porém mais acentuado). No caso da água, isto acontece devido a mudança de estado de sólido para líquido. Para o trigo, sugeriram a existência de dois tipos de "água presa" com mudança de comportamento pronunciada em torno de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

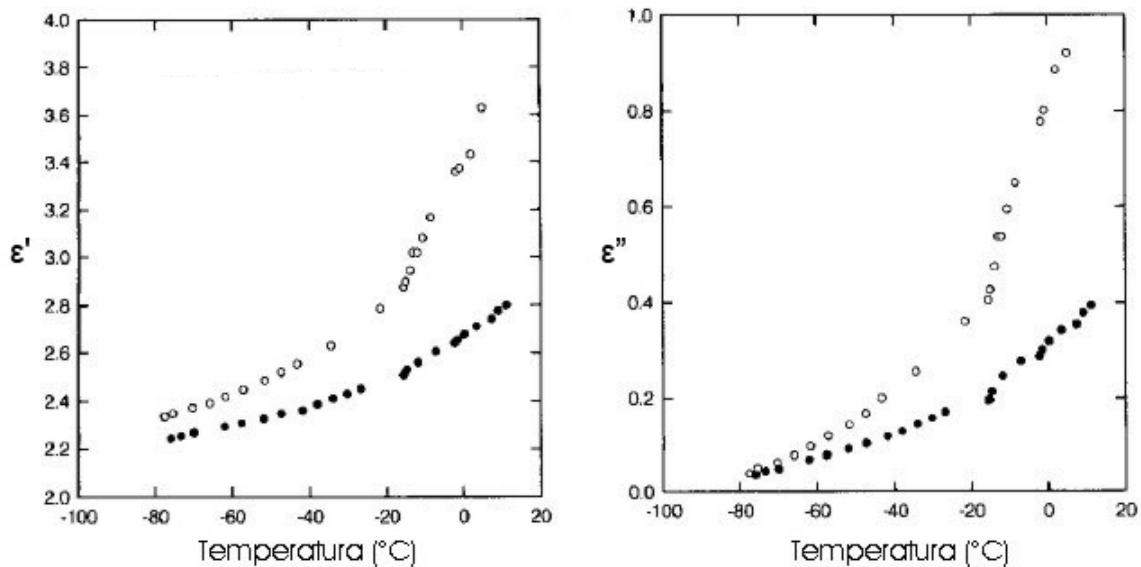


Figura 2.15 – Variação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  do trigo em função da temperatura, a  $8\text{ GHz}$ ,  
 $\circ$   $M = 15, 7\%$ ,  $\bullet$   $M = 23, 6\%$  (TRABELSI E NELSON, 2004)

Nelson (1991) considera o comportamento das propriedades dielétricas de grãos diante dos efeitos da temperatura e frequência bastante complexo. Sugere que, talvez, o melhor meio de se obter tais propriedades seja através da medição sob as condições de interesse.

#### 2.4.4 Dependência da densidade volumétrica da mistura ar-grão

A densidade volumétrica de uma mistura ar-grão  $\rho$  depende da forma, dimensões, temperatura, umidade, estrutura e condições da superfície do grão (Kraszewski e Nelson, 1994). Adicionalmente, caso a medição seja executada em tempo real (onde existe um fluxo de grãos) a densidade volumétrica toma forma de um problema sério a ser vencido. Neste sentido, Berbert *et al* (2004b) mostram que, nas operações de controle automático de processos, a utilização de medições utilizando amostras estáticas vem sendo progressivamente substituída pela medição do teor de água do produto em movimento, sem a necessidade da retirada de amostras localizadas.

Para tanto, sensores capacitivos operando em rádio-freqüência são considerados ferramentas adequadas.

Na análise do desenvolvimento da instrumentação que utiliza esses sensores em tempo real, é possível observar a tendência do emprego de freqüências de oscilação cada vez maiores com o passar dos anos. Inicialmente, os circuitos de corrente contínua foram sendo substituídos por aqueles que operavam com corrente alternada. Logo a seguir, foram introduzidos os medidores que funcionam em radiofreqüências e, atualmente, o maior interesse nos institutos de pesquisa e em universidades tem recaído sobre os circuitos que utilizam microondas.

A influência do dielétrico depende da quantidade de massa que interage com o campo elétrico aplicado. Assim, a massa por unidade de volume (densidade) influenciará nas propriedades dielétricas. Isto é especialmente notável em dielétricos particulados.

Este é o caso dos grãos que, dispostos em sensores apropriados para determinação de umidade através do princípio capacitivo, apresentam grandes espaços vazios (preenchidos pelo ar presente no local). Desta forma, ocorre uma interação da quantidade de ar presente na amostra de grãos a ser analisada. Esta quantidade de ar varia, de amostra para amostra, em função da disposição que tomam dentro do sensor, implicando em uma densidade média maior ou menor. Esta variação média de densidade constitui-se em um fator de variação dielétrica que, conseqüentemente, afeta os valores de permissividade de uma amostra.

Kraszewski e Nelson (1994) explicam este fenômeno da seguinte maneira:

Define-se  $M$  como sendo o teor de umidade dos grãos (em porcentagem, base úmida) dada por

$$M = \frac{m_w}{m_w + m_d} \times 100 = 100\zeta \quad (2.11)$$

onde  $m_w$  é a massa de água contida nos grãos,  $m_d$  a massa de material seco (massa de grãos secos) e  $\zeta$  a porcentagem fracionada de umidade.

Para um dado volume  $v$  (que neste trabalho é de aproximadamente um litro, correspondente ao volume do reservatório do sensor), a equação 2.11 pode ser reescrita da seguinte forma

$$\zeta = \frac{\frac{m_w}{v}}{\frac{m_w}{v} + \frac{m_d}{v}} = \frac{k}{\rho} \quad (2.12)$$

onde  $k$  é a concentração da água presente na massa de grãos por unidade de volume.

Métodos padrões de determinação de umidade  $M$  baseiam-se na definição dada pela equação 2.11 e exigem a determinação das componentes  $m_w$  e  $m_d$ . Esses componentes podem ser obtidos pelos métodos diretos de determinação de umidade que envolvem a evaporação de água (método estufa) ou destilação.

No entanto, métodos indiretos de determinação de umidade (como o capacitivo), baseados na leitura de sinais elétricos, são influenciados não apenas pela massa de água contida nos grãos ( $m_w$ ) mas também pela densidade volumétrica ( $\rho$ ). Como o sensor possui uma mistura ar-grão, variações de  $\rho$  influenciarão nos sinais elétricos, introduzindo uma fonte de erro.

Portanto, para que este erro seja minimizado, é necessário que o volume  $v$  seja constante e a massa de material seco  $m_d$  também o seja. Manter  $v$  constante durante uma medição estática (isto é, sem fluxo de grãos) é perfeitamente viável. Porém  $m_d$  não é constante visto que depende da forma, dimensões, temperatura, umidade, estrutura e condições da superfície do grão (como já foi mencionado) o que explica a influência da densidade na leitura de umidade.

Dentre os fatores que influenciam a leitura de umidade, Benedetti e Jorge (1987) estudaram a influência da própria umidade. Em seu estudo "Influência da Variação do Teor de Umidade sobre os Pesos Específicos, Aparente e Real, e a Porosidade de Vários Grãos", foi observada a diminuição do peso específico real com o aumento do teor de umidade para milho, soja, feijão e trigo.

Benedetti e Jorge (1987) definiram os fatores de estudo como se segue:

- Volume Real - Volume ocupado pela massa de grãos;
- Volume Aparente - Volume ocupado pela massa de grãos mais o volume intersticial (equivalente ao volume  $v$  do reservatório do sensor);
- Peso Específico Real ( $P_r$ ) - Relação entre a massa de grãos e seu Volume Real;
- Peso Específico Aparente ( $P_{ap}$ ) - Relação entre a massa de grãos e seu Volume Aparente (equivalente à densidade volumétrica  $\rho$ );

- Porosidade ( $P$ ) - Relação entre o volume intersticial e o Volume Aparente, dada em porcentagem;
- Umidade - Teor de umidade determinado pelo método direto estufa a  $105^{\circ}C/24h$  (equivalente ao  $\zeta$ ).

Os experimentos foram realizados e uma regressão linear obtida para cada tipo de grão, o que resultou nos gráficos das Fig. 2.16, 2.17 e 2.18, onde o autor utilizou como unidade de medida para o teor de umidade não a porcentagem mas sim a unidade decimal.

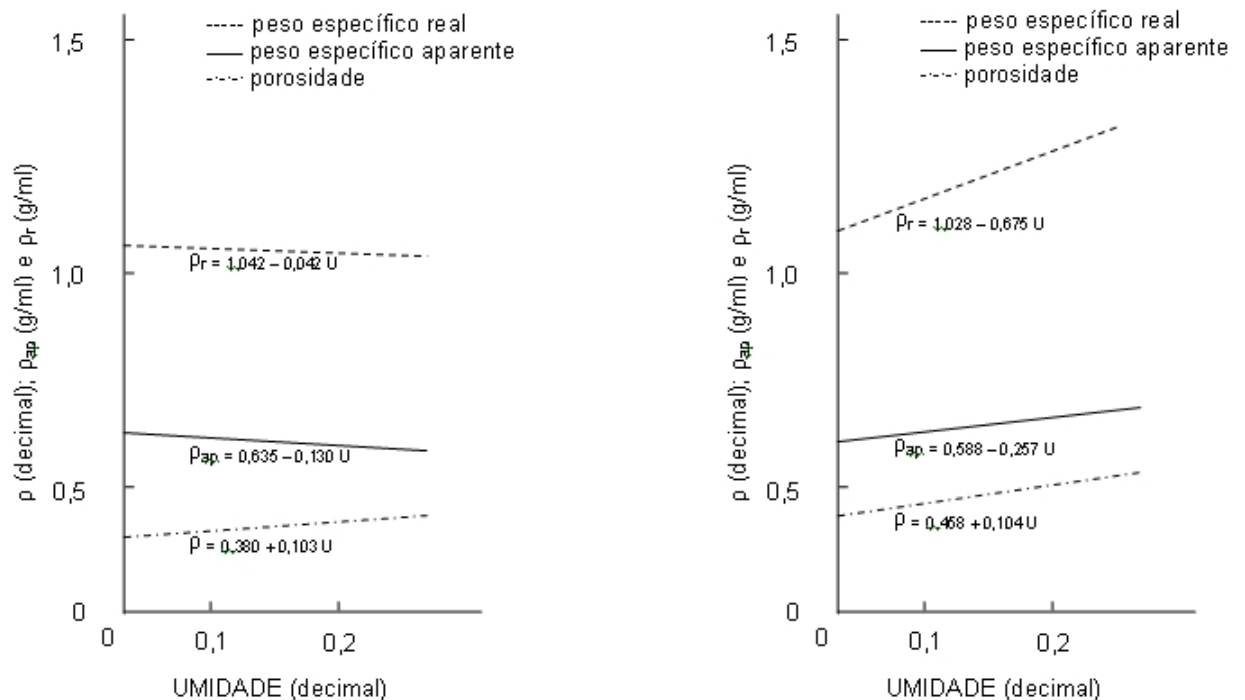


Figura 2.16 – Peso Específico Aparente e Real e Porosidade em função da Umidade para o amendoim e arroz em casca, nesta seqüência (BENEDETTI E JORGE, 1987)

Concluiu-se que os produtos amendoim, feijão, milho, soja e trigo mostraram uma diminuição do Peso Específico Real e Peso Específico Aparente (densidade volumétrica  $\rho$ ) com o aumento do teor de umidade. Comportamento inverso ao observado para o arroz em casca. Também, com excessão do amendoim, os produtos apresentaram um aumento da Porosidade com o acréscimo do teor de umidade.

A fim de explicar o comportamento distinto do arroz em casca, Benedetti e Jorge (1987) sugeriram que a água adicionada para elevar sua umidade aumentou o volume do grão que,

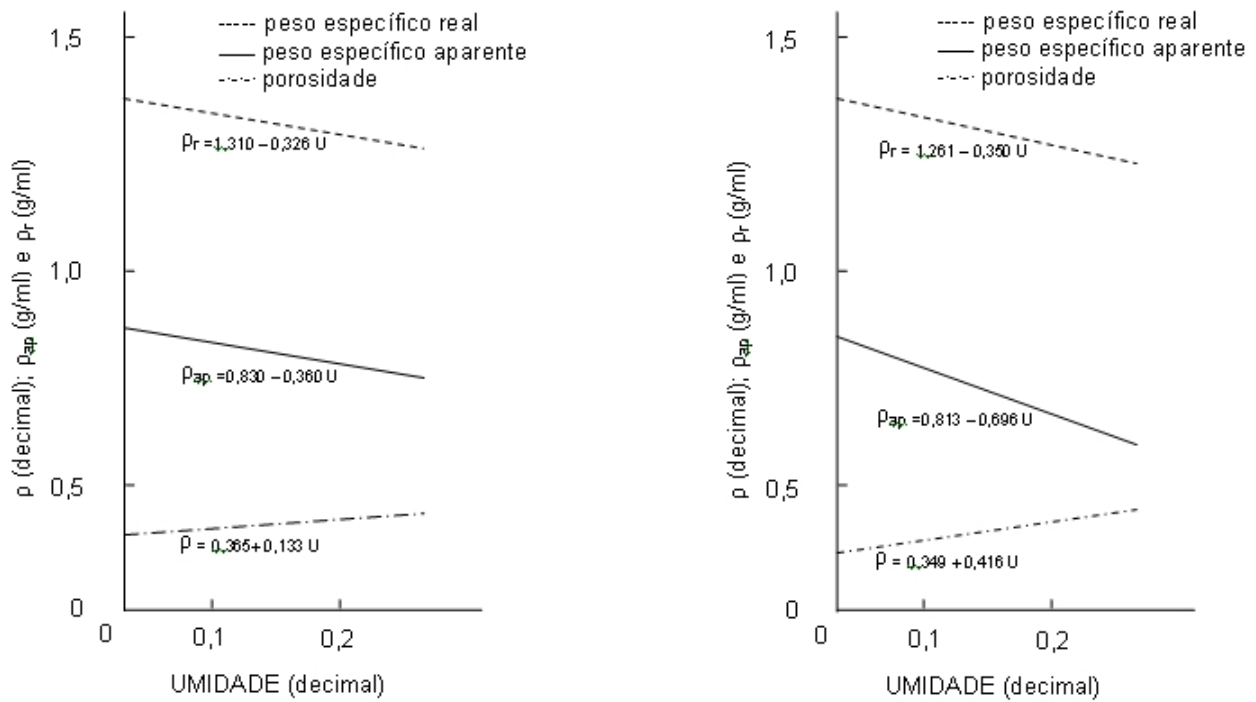


Figura 2.17 – Peso Específico Aparente e Real e Porosidade em função da Umidade para o feijão e milho, nesta seqüência (Benedetti e Jorge (1987))

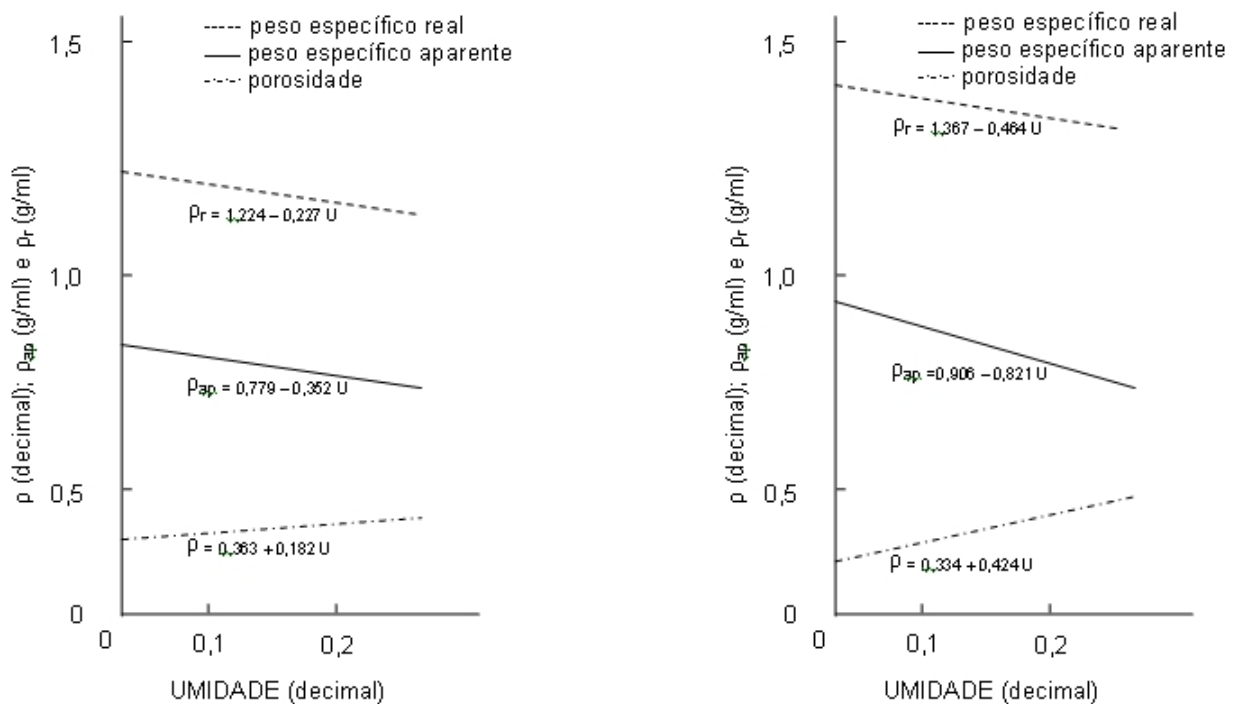


Figura 2.18 – Peso Específico Aparente e Real e Porosidade em função da Umidade para a soja e trigo, nesta seqüência (Benedetti e Jorge (1987))



expandido-se, ocupou o espaço vazio entre a casca e o grão. Isto propiciou um aumento da massa do arroz sem que produzisse o correspondente aumento de volume, explicando o aumento dos Pesos Específicos Real e Aparente. Tal fato não ocorreu nos outros produtos.

## 2.5 O Sensor Capacitivo: características construtivas

Os sensores capacitivos atuais apresentam uma variação muito grande de forma e desenho, todos projetados para atender de maneira otimizada à aplicação a que se propõe.

Tsamis e Avaritsiotis (2004) estudaram o projeto de um sensor capacitivo plano para monitoramento de umidade de produtos industriais em tempo real. Chegaram a um desenho com três eletrodos internos a uma câmara eletricamente aterrada suspensa sobre o material a ser monitorado. À medida que o material avança, caso haja uma variação da umidade, o sensor é capaz de acusar tal variação.

Quando o produto a ser medido são grãos, um dos pioneiros na elaboração de projetos e construção de protótipos para medição de umidade de sementes é Matthews (1963). Em seu trabalho, são discutidos vários fatores que influenciam no projeto de medidores com princípio capacitivo, incluindo: desenho da cuba sensora (sendo sugeridas as de placas paralelas, cilindros concêntricos e base-colar de condução, conforme Fig. 2.19), método de enchimento da cuba e efeitos das propriedades das amostras na leitura do equipamento. Algumas de suas conclusões são apresentadas a seguir:

- Cubas sensoras de aproximadamente  $25\text{-}30\text{ cm}^3$  de volume podem ser usados com circuitos eletrônicos para medição de capacitância (da ordem de pF - *picoFarad*) a fim de construir um medidor de umidade simples e portátil;
- Foi conseguida uma repetibilidade de leitura com amostras de até 20g, sem ajuda mecânica de preenchimento da cuba sensora;
- A correção automática de temperatura mostrou-se exequível.

Berbert et al (1998) classificam como duas as configurações básicas normalmente utilizadas para construção de sensores capacitivos: capacitores de placas planas paralelas e capacitores de cilindros concêntricos. O sensor de placas planas tem a vantagem de apresentar uma

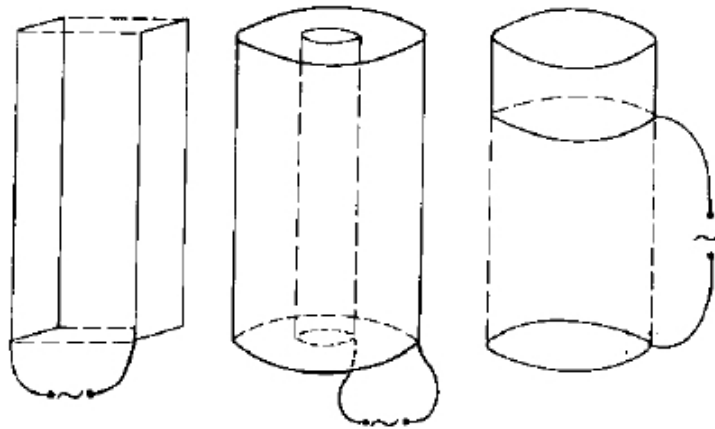


Figura 2.19 – Três possíveis configurações para cuba sensora segundo Matthews (1963): placas paralelas, cilindros concêntricos e base colar de condução, nesta seqüência

distribuição uniforme das linhas de campo elétrico entre as duas placas. No caso de capacitores de cilindros concêntricos, a principal vantagem reside no fato do auto-isolamento proporcionado quando o eletrodo externo é conectado ao fio terra (KRAUS e CAVER, 1973 APUD BEBERT ET AL, 1998).

Outra característica importante é o tamanho do capacitor. Para medições em amostras estáticas, considera-se adequado o capacitor que possua volume útil suficiente a ser preenchido por uma amostra representativa, obtida a partir da quantidade de grãos recolhidos em uma única etapa durante o processo de amostragem. De acordo com Berbert et al (1998), a experiência tem mostrado que volumes úteis de 20 a 25  $cm^3$ , eletricamente ativos, têm alcançado um grau satisfatório de repetibilidade.

Pode-se destacar as características construtivas de sensores para medição de umidade em alguns trabalhos que se seguem.

Berbert e Stenning (1997) construíram um capacitor de cilindros concêntricos para determinação das propriedades dielétricas de sementes de trigo conforme a Figura 2.20. O eletrodo externo do capacitor foi construído com um tubo de latão com diâmetro interno de 85,2  $mm$  e o eletrodo interno com um tarugo de latão de diâmetro de 29,8  $mm$ . Uma base anular (feita de politetrafluoroetileno - PTFE) de 11,3  $mm$  de espessura foi utilizada para manter os dois cilindros em posição concêntrica. O volume livre do capacitor é de  $5,5 \times 10^{-4} m^3$ , com capacidade aproximada de 0,45  $kg$  de trigo com teor de umidade de 13 %*b.u.* A forma cilíndrica foi escolhida com a finalidade de sua utilização para medição em linha (fluxo de grãos) do teor de umidade de

uma coluna de grãos em movimento, facilitando sua condução (BERBERT e STENNING, 1996).

Lawrence, Funk e Windham (1999) construíram um sensor de placas paralelas como mostrado na Figura 2.21. Constitui-se de um sensor contendo uma placa central de alumínio ( $587 \times 90 \times 5$ ) *mm* e outras duas (do mesmo material), externas ( $600 \times 90 \times 6$ ) *mm*, todas conectadas a duas placas laterais especiais que transmitem os sinais elétricos a um analisador de impedância HP 4291A. A separação entre as placas é de 31 *mm*. Tal volume foi restringido por duas placas de poliestireno que limitou o volume útil para recepção dos grãos a  $850 \text{ cm}^3$ . Desenhado para trabalhar em uma faixa de frequências de 1 a 500 *MHz*, a forma de placas paralelas foi escolhida devido a simplicidade de geometria e sensibilidade a variações elétricas.

Existem ainda estudos que se dedicam a desenvolver equipamentos para medição de umidade em apenas um grão ou semente. É o caso do trabalho de Nelson, Lawrence e Kandala (1993). Eles construíram um sensor de placas paralelas constituído de eletrodos de latão de 20 *mm* de diâmetro para milho, 25 *mm* para amendoim e 50 *mm* para noz. A semente (ou noz) é levemente pressionada entre os eletrodos e a impedância é medida, de onde se obtém o teor de umidade.

Berbert et al (1998) destacam, no entanto, que são poucas as informações disponíveis na literatura sobre os aspectos envolvidos e os problemas inerentes à construção de sensores para determinação do teor de umidade de grãos.

Informação adicional pode ser conseguida em bases de patentes. Existem diversas patentes relacionadas a medidores de umidade para grãos. Ediger e Boelts (1990) inventaram um sensor de umidade capacitivo para uso em secadores de grãos, descrevendo a cuba sensora e o circuito eletrônico de controle. A Figura 2.22 mostra a cuba sensora instalada dentro do secador de grãos (constituída de um sensor capacitivo de placas paralelas, com placas externas 140 e 144 mais a placa interna 146) e a Fig. 2.23 um diagrama de blocos do circuito eletrônico proposto.

A cuba sensora é composta por um capacitor de placas paralelas de laterais abertas, visto que ficará permanentemente envolto em um volume de grãos estáticos. O sensor trabalha com a leitura das propriedades dielétricas dos grãos ( $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ ). Estas propriedades estão relacionadas com a umidade através de uma equação determinada pelo autor (que também inclui a frequência de oscilação e a temperatura).

O diagrama de blocos da Fig. 2.23 expõe a utilização de um oscilador, um detector

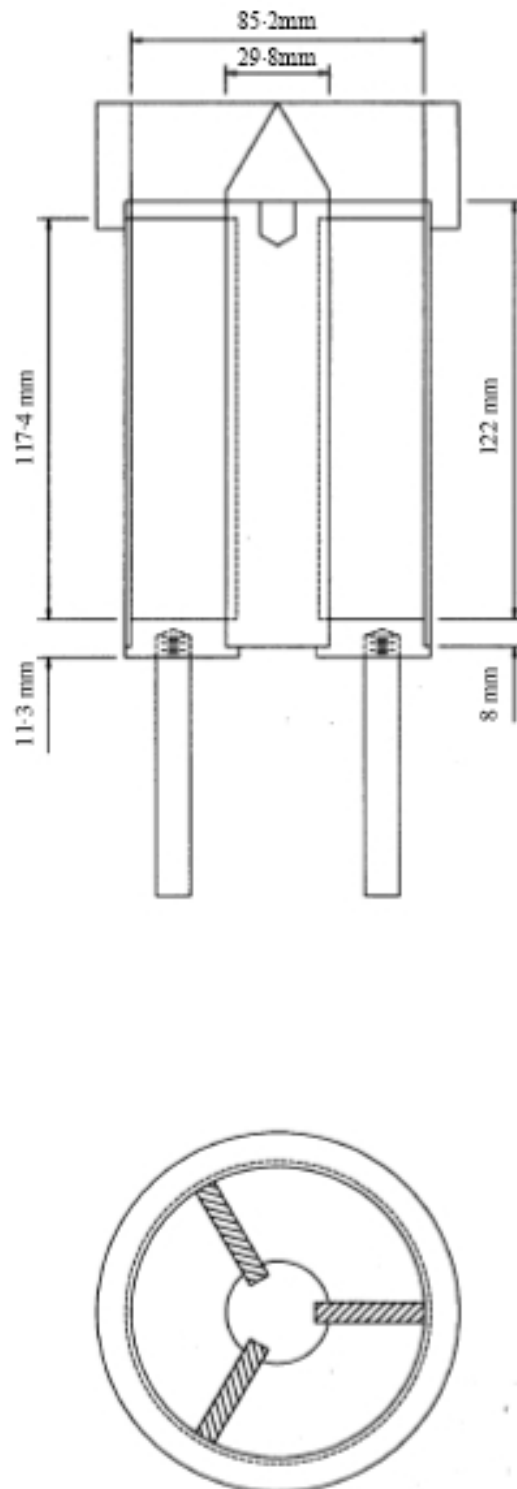


Figura 2.20 – Desenho do capacitor utilizado por Berbert e Stenning (1997) para determinação das propriedades dielétricas do trigo

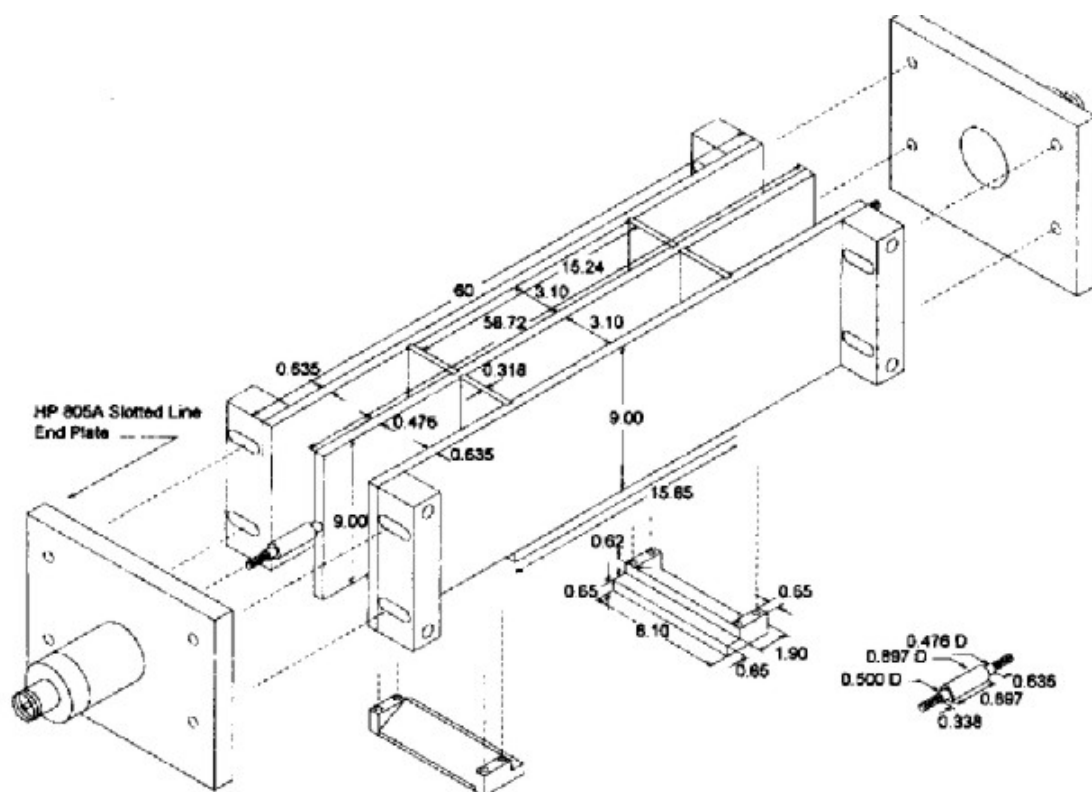


Figura 2.21 – Desenho do capacitor utilizado por Lawrence, Funk e Windham (1999) para determinação do teor de umidade do milho

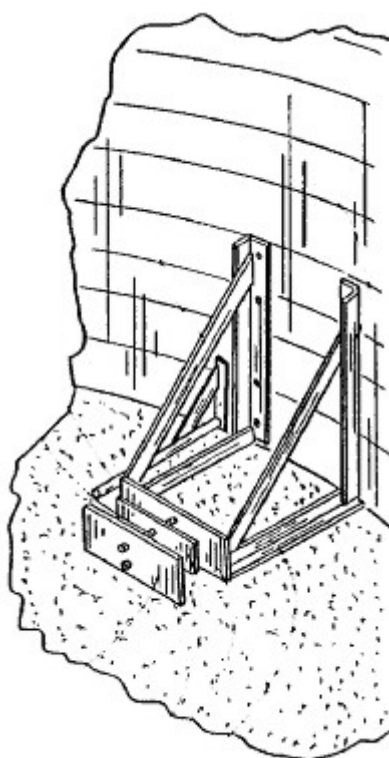


Figura 2.22 – Desenho do capacitor utilizado por Ediger e Boelts (1990) para determinação do teor de umidade de grãos armazenados em secadores de grãos

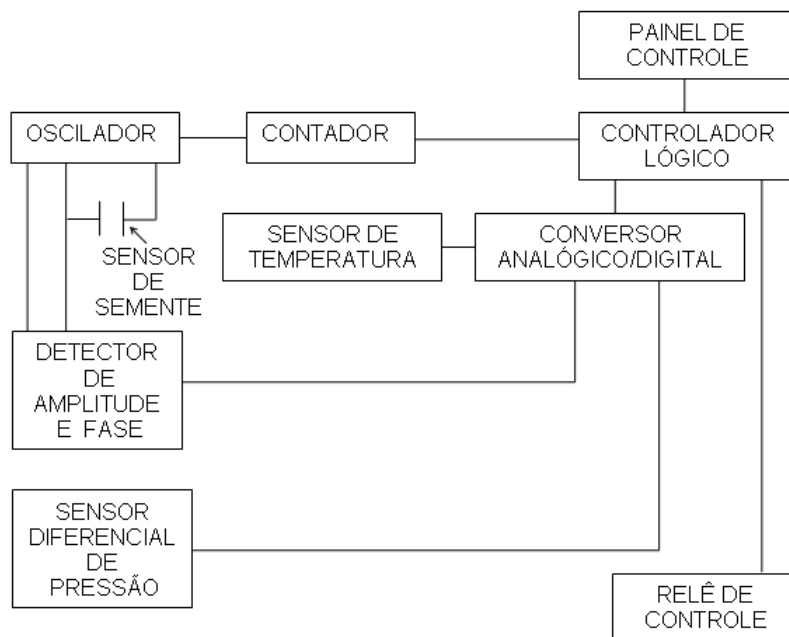


Figura 2.23 – Diagrama de blocos do circuito eletrônico proposto por Ediger e Boelts (1990)

de frequência (amplitude e fase), um sensor de temperatura, um conversor analógico/digital e um controlador lógico. O capacitor é parte de um circuito oscilador RC. Portanto, mudanças na capacitância provocam uma alteração na frequência de saída do oscilador que é captada pelo contador. O controlador toma esta informação junto com a temperatura e processa a leitura de umidade.

A patente anterior descreve um sensor de construção simples e robusta e baixos custos de construção, instalação e operação. No entanto, é um sistema adaptado para secadores e passível de diversas modificações para trabalho em uma colhedora.

Satake (1983) descreve um sistema para incremento da precisão de leitura de umidade através de um aparato vibratório para acomodação dos grãos dentro do sensor. É um sistema de aplicação geral mas com enfoque na melhoria da leitura de umidade. Procura aumentar a massa de grãos que efetivamente participam do campo capacitivo através de sua "compactação" dentro do sensor por meio vibratório. Tal proposta, no entanto, leva a um dispositivo de construção relativamente complexa.

Nelson *et al* (2001) propõe um medidor de umidade de placas paralelas montado no elevador de grãos de uma colhedora. Este medidor possui grande área de placas, o que permite uma amostra com volume superior aos tradicionalmente encontrados. A Figura 2.24 ilustra

suas características construtivas, sendo suas placas referenciadas pelos números 78, 80 e 82. Este sistema também usa um controlador que automatiza as tarefas, estando sua aplicação relacionada com a agricultura de precisão e não com a colheita de parcelas.

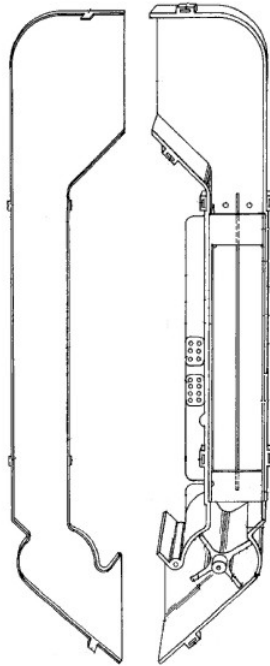


Figura 2.24 – Desenho do capacitor projetado por Nelson *et al* (2001), montado em colhedora para determinação do teor de umidade de grãos

Rains *et al* (2005) propõe a construção de um sensor de umidade de placas paralelas para colhedora convencional de grãos usada na agricultura de precisão. O uso de medidores de umidade em colhedoras (em conjunto com um GPS - *Global Position System*) provê um mapa de umidade da área colhida, além de ser usado também para aplicações de monitoramento do campo. O autor ressalta que os medidores são usualmente instalados em um de dois pontos distintos de uma colhedora: no tanque graneleiro ou no elevador de grãos (mostrando as vantagens e desvantagens de cada um).

No entanto, Rains *et al* (2005) foca seu trabalho no desenvolvimento de um sistema de medição de umidade com características mecânica e elétricas inovadoras. O projeto da cuba sensora (Fig. 2.25) impõe um campo elétrico com linhas de campo paralelas às placas do capacitor (referenciadas pelos números 64 e 68) e não perpendiculares, o que, segundo o autor, reduz consideravelmente os efeitos de borda aumentando a precisão de leitura. Também detalha o circuito eletrônico e expõe o princípio de funcionamento: capacitivo com circuito próprio para

leitura da permissividade complexa.

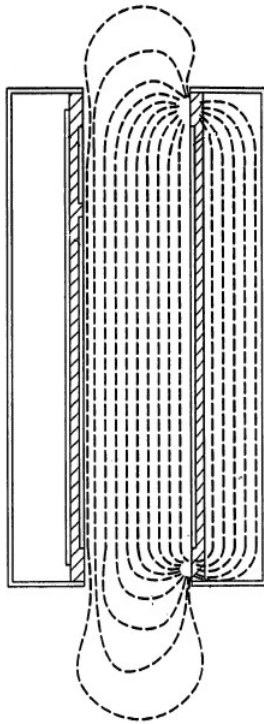


Figura 2.25 – Desenho do capacitor projetado por Rains *et al* (2005), montado em colhedora para determinação do teor de umidade de grãos

Apesar de ser um equipamento robusto, não se aplica à colheita de parcelas, visto que seu desenho mecânico não é apropriado e seu conceito de projeto eletrônico é demasiado complexo, elevando os custos do produto.

Pode-se citar, ainda, Toshio, Hiroaki e Masahirosatake (2003) e Ritsuko (2006) como inventores que desenvolveram sistemas de medição de umidade instalados em colhedora, porém direcionados à colheita convencional.

Campbell, Campbell e Christensent (1996) descrevem um sistema completo de medição de massa e umidade de parcelas montado em uma colhedora. Este trabalho procura inovar na precisão de leitura. Conta com vários compartimentos que, através de sistemas próprios, estabelecem um fluxo constante de amostras de sementes pelo medidor. Conta também com meios para compensar e eliminar influências externas provenientes da colheita tais como acelerações verticais da colhedora ou inclinações do terreno. Apesar de mostrar todo o processo que cada parcela percorre para medição de massa, umidade e densidade, Campbell, Campbell e Christensent (1996) não fazem referência ao tipo e construção do medidor de umidade utilizado, inviabilizando uma



análise sobre o sensor proposto na presente invenção.

Lagares, Lagares Jr e Prado (2002) com o mesmo objetivo da patente anterior, propuseram um sistema diferente e mais simples de análise de parcelas de sementes, onde todo o processo de leitura de massa e umidade é feito em apenas um compartimento.



## CAPÍTULO III

### DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE UMIDADE (S.M.U.)

Este Capítulo descreve as etapas de desenvolvimento e construção do protótipo do S.M.U.<sup>1</sup> Forma do sensor, materiais utilizados, esquemas elétricos, testes realizados e dificuldades encontradas são discutidos tendo em mente o objetivo de se alcançar um sistema de medição que atenda aos requisitos de construção propostos a seguir. A seção 3.1 descreve e discute cada Requisitos de Construção. As seções posteriores detalham o desenvolvimento do S.M.U.

#### 3.1 Requisitos de Construção

Para que o S.M.U. pudesse ser utilizado nas condições de trabalho de uma colhedora, houve a necessidade de se estabelecer critérios de construção do S.M.U. que satisfizessem tais necessidades. Esses critérios foram estabelecidos em função das condições esperadas de trabalho de uma colhedora e da experiência prévia deste tipo de trabalho em poder da Mecamáquina Ltda. A seguir são descritos os critérios que nortearam a construção do S.M.U, chamados de Requisitos de Construção (**RC**).

**RC-01** - Robustez mecânica → apresentar resistência a vibrações mecânicas e eventuais choques mecânicos, inerentes às colhedoras;

**RC-02** - Rápida Resposta de Leitura → apresentar rápida leitura de umidade para que

---

<sup>1</sup>Patente requerida sob nº PI 0801428-0

se torne viável comercialmente, visto que os equipamentos importados operam no intervalo de 15 a 30s por parcela colhida;

**RC-03** - Resistência às Intempéries → apresentar resistência às altas temperaturas com exposição ao sol, alta umidade do ar em dias chuvosos e exposição à poeira, inerentes a qualquer tipo de colhedora;

**RC-04** - Simples Operação → a fim de que seja manuseado pelo próprio condutor da colhedora;

**RC-05** - Compatibilidade com um Controlador Lógico Programável → responsável pela automação de todo o processo e armazenamento dos dados obtidos;

**RC-06** - Alimentação Elétrica 12 V → única fonte de energia presente em uma colhedora;

**RC-07** - Baixo Custo → Visando as pequenas empresas de pesquisa de sementes (que no Brasil são muitas), comumente limitadas em seus programas de pesquisa pelo alto custo de aquisição por serem equipamentos importados.

Tais critérios serão observados em cada etapa de construção do S.M.U. de modo que se tenha um sistema funcional e adequado às condições de trabalho.

### 3.2 O Sistema de Medição de Umidade (S.M.U.)

O S.M.U. é um sistema de medição que deve ser capaz de, além de medir o teor de água<sup>2</sup> de diversas sementes, armazenar os dados obtidos em memória digital e ainda permitir a automação da tarefa de troca de sementes. Para isto, o S.M.U. é constituído de módulos e sub-sistemas capazes de fazer com que o circuito básico de medição de umidade trabalhe adequadamente em uma colhedora e garanta a possibilidade de realização das tarefas descritas acima.

A fim de esquematizar um sistema que atenda todas as necessidades mostradas, apresenta-se na Fig. 3.1 um diagrama funcional do S.M.U. proposto.

---

<sup>2</sup>A partir deste capítulo a expressão - teor de água - foi utilizada no lugar de - umidade - (expressão esta comumente utilizada para definir o teor de água presente em grãos e sementes na forma de água presa ou água livre). O uso de teor de água em vez de umidade foi considerado mais apropriado conforme a justificativa dada por Barbedo (1997), tendo, no entanto, exatamente o mesmo significado que umidade. Seu uso foi mantido no capítulo anterior visando não alterar a utilização desta expressão pelos vários autores citados.

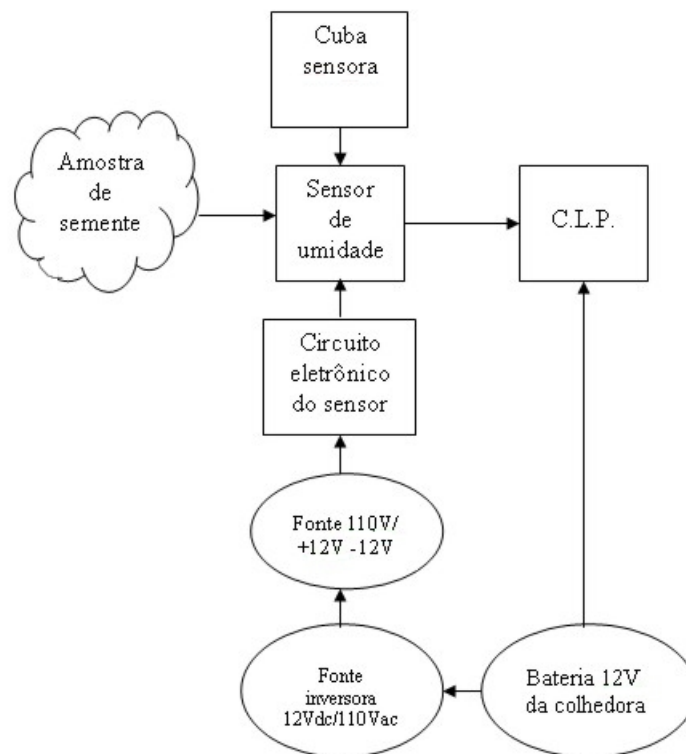


Figura 3.1 – Diagrama esquemático do Sistema de Medição de Umidade (S.M.U.)

Em virtude da fonte de alimentação presente em uma colhedora ser uma bateria 12  $V_{cc}$ , o esquema contempla módulos de conversão para adequação da alimentação elétrica dos componentes eletrônicos. Cada módulo mostrado na Fig. 3.1 é explicado a seguir:

- Fonte inversora entrada CC 12  $V$ /saída CA 110  $V$ . Fonte com a finalidade de converter a tensão 12  $V_{cc}$  da bateria da colhedora em uma saída 110  $V_{ca}$ . Saída a ser utilizada para alimentação de outros módulos;
- Fonte de alimentação +12  $V$ /-12  $V$ . Responsável pela alimentação do sensor de umidade, constituído de componentes eletrônicos com esta alimentação;
- Cuba Sensora que será descrita no item 3.3;
- Circuito eletrônico que será descrito no item 3.5;
- Sensor de umidade. Unidade sensora de umidade de sementes caracterizada pelo trabalho conjunto da cuba sensora com o circuito eletrônico;
- Controlador Lógico Programável (C.L.P.). Módulo responsável pela aquisição do sinal de saída do sensor de umidade (através da placa A/D integrada) e conversão do sinal

recebido em um valor de teor de água mostrado em um mostrador e guardado em memória digital. Esta conversão será feita através de uma curva de calibração (ver capítulo 4). Também apresenta capacidade de automação de tarefas como troca de sementes (através, por exemplo, de um sistema eletro-pneumático).

- Sistema de Medição de Umidade. Sistema operacional de medição de umidade constituído de todos os módulos descritos acima.

### **3.3 Construção Mecânica do Sensor (Cuba Sensora)**

Define-se como cuba sensora o reservatório que receberá uma quantidade definida de sementes para medição do teor de água das mesmas. Este reservatório deve se comportar como um capacitor para que, com o auxílio de um circuito elétrico apropriado, possa realizar a medição indireta de teor de água das sementes.

Sabe-se que os capacitores caracterizam-se pela existência de duas placas paralelas condutoras de eletricidade separadas por um material isolante denominado dielétrico. Como o sensor em questão deve medir a presença de umidade em grãos, tais grãos serão considerados como meio dielétrico. Assim, em tese, espera-se que a capacitância do sensor irá variar em função do teor de água presente na amostra dentro da cuba sensora.

Na seção 2.5 é apresentado o trabalho de Berbert et al (1998) no qual apresentam duas configurações básicas normalmente utilizadas para construção de sensores capacitivos destinados a sementes: capacitores de placas planas paralelas e capacitores de cilindros concêntricos. Os de cilindros concêntricos apresentam uma vantagem importante para os objetivos requisitados neste trabalho: o auto-isolamento proporcionado quando o eletrodo externo é conectado ao fio de aterramento. Como em uma colhedora toda a estrutura é aterrada, o eletrodo externo do sensor também estará aterrado, evitando-se ruídos que provocam interferências de leitura. Também evita-se a necessidade de uso de material isolante no suporte do sensor durante a instalação do mesmo na colhedora devido ao fato de o eletrodo externo possuir a mesma polaridade.

No entanto, o perfil circular característico dos capacitores de cilindros concêntricos apresenta maiores dificuldades de construção mecânica, tornando mais complexa a automação da

liberação das sementes de seu interior através de sistema pneumático. Outra desvantagem é a possibilidade de armazenar água no cilindro interno. Uma colhedora fica exposta a alta umidade do ar das madrugadas ou mesmo a chuvas ocasionalmente. Como o cilindro interno é vazado e tampado, pode ocorrer o acúmulo de água no seu interior causando problemas para um correto funcionamento.

Visando a um capacitor que alie a facilidade de construção mecânica do de placas paralelas com o aterramento externo do de cilindros concêntricos, foi idealizado um capacitor de seção quadrada com um eletrodo interno, isolado, feito de placa plana.

Acredita-se que o sensor com o formato proposto alia a vantagem de aterramento externo do capacitor de cilindros concêntricos com a maior uniformidade das linhas de campo dos capacitores de placas paralelas, além das facilidades de construção mecânica.

A Figura 3.2 mostra um desenho de conjunto do sensor proposto. Foi construído um reservatório de base quadrada (3) (aço ABNT 1010 – 3,2 *mm* de espessura) a fim de acondicionar os grãos de maneira adequada. Uma placa isolada de aço inoxidável (2) (aço inoxidável austenítico 304L – 2,0 *mm* de espessura) foi convenientemente escolhida devido à alta resistência à corrosão e posicionada no interior do reservatório. O reservatório responde por uma das placas paralelas e a placa de aço inoxidável à outra placa. Assim tem-se um recipiente com característica capacitiva capaz de receber os grãos que funcionarão como dielétrico do mesmo. O isolamento foi conseguido com a fabricação de um suporte isolante (1) (poliamida 6.6 – nytanil® 6.6). As dimensões são 109 mm de comprimento, 109 mm de largura e 94 mm de altura, perfazendo um volume aproximado de  $1,12 \cdot 10^{-3} m^3$  (1,1 litro), garantindo um significativo volume de amostragem. A placa de aço inoxidável (2) é fixada ao suporte isolante (1) através das abas de fixação (5) da placa de aço inoxidável por meio de parafusos. O pino de contato (4) (latão) que é soldado à placa de aço inoxidável (2) é responsável pelo contato da placa com o circuito elétrico. O parafuso (6) faz o aterramento do reservatório de base cúbica (3) através de fio condutor ligado ao circuito elétrico. A parte inferior é articulada para facilidade de retirada dos grãos durante os ensaios e possibilitar a sua posterior automatização na colhedora (através de um sistema pneumático, por exemplo). A Figura 3.3 mostra a cuba sensora em sua concepção final.

Relativo à construção mecânica, o sensor acima descrito é de construção robusta, feito de materiais que resistem naturalmente às intempéries e de baixo custo de aquisição, atendendo

aos **RC-01**, **RC-03** e **RC-07**.

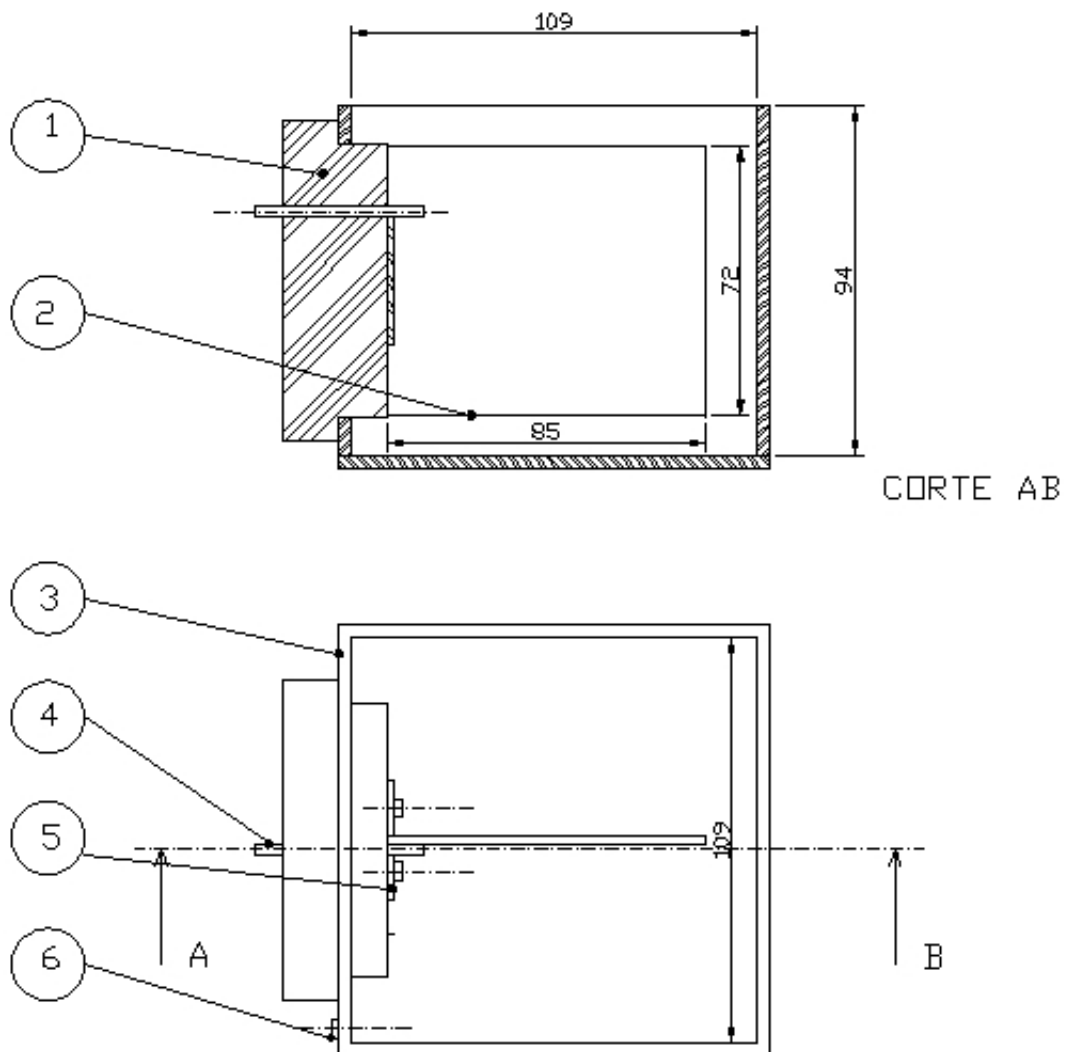


Figura 3.2 – Desenho de conjunto da cuba sensora

### 3.4 Circuito Elétrico e sua Função de Transferência

Nesta seção será definido o circuito elétrico a ser implementado ao sensor (descrito no item anterior) e suas características. O circuito deverá atender aos **RC-02**, **RC-03**, **RC-04**, **RC-05**, **RC-06** e **RC-07**.

Mamishev et al (2002), em seu trabalho sobre estimação de parâmetros na medição dieletrométrica, utiliza a configuração mais simples de um capacitor de Maxwell para início dos estudos. O objetivo é determinar as propriedades dielétricas de um material inserido em um





Figura 3.3 – Concepção final da cuba sensora

capacitor de placas paralelas. Assim, tem-se um capacitor composto por dois dielétricos em série, conforme a Fig. 3.4.

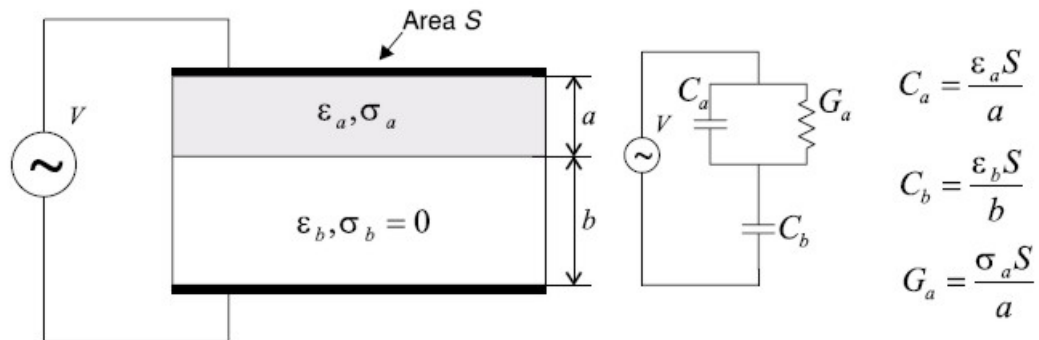


Figura 3.4 – Esquema do circuito elétrico utilizado por Mamishev et al (2002)

A camada inferior é um dielétrico perfeito de condutividade  $\sigma_b$  igual a zero e permissividade dielétrica  $\epsilon_b$  conhecida. A camada superior é o dielétrico cujas propriedades devem ser obtidas através da medição das características dielétricas. A Figura 3.4 mostra também o esquema do circuito elétrico e o circuito equivalente.

Apesar de simples, tal circuito não representa as condições reais do sensor proposto visto que o dielétrico será inserido em apenas uma camada (preenchimento completo do sensor com grãos).

O circuito proposto por Pinto (1997) também é um circuito muito simples e com potencial para atender aos Requisitos de Construção (seção 3.1). Devido a sua simplicidade, já foi utilizado com sucesso nos trabalhos realizados por Pinto (1997) e Rende (1999), relacionados ao desenvolvimento de um sistema de monitoramento de umidade de solo. Este circuito baseia-se na presença de uma fonte alternada de tensão  $U_e$ , um resistor divisor de tensão  $R_1$  e um capacitor real representado pelo resistor  $R_2$  e o capacitor ideal  $C$  (Figura 3.5). O capacitor real citado

passará a representar o sensor construído e descrito na seção 3.3.

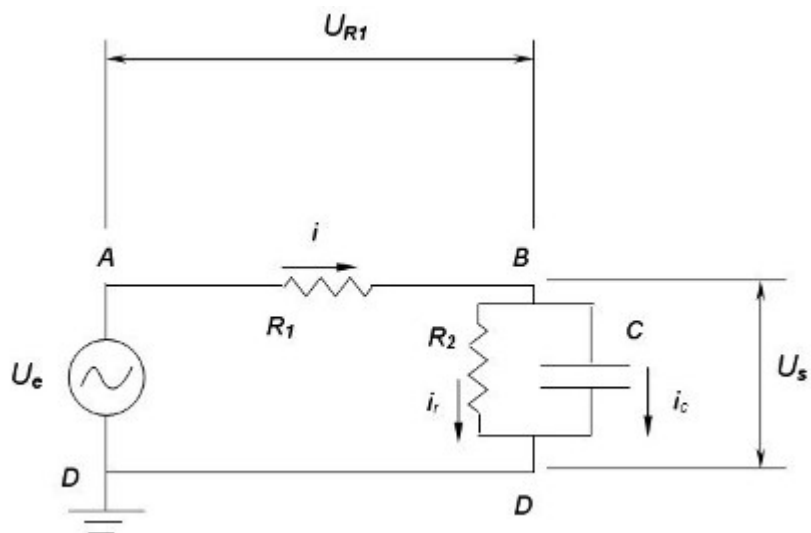


Figura 3.5 – Esquema do circuito elétrico utilizando o sensor de medição de umidade

Da Fig. 3.5, tem-se que:

$$U_e = U_A - U_D \quad (3.1)$$

$$U_{R_1} = U_A - U_B \quad (3.2)$$

Subtraindo 3.1 de 3.2:

$$U_e - U_{R_1} = U_B - U_D \quad (3.3)$$

e ainda:

$$U_B - U_D = U_s \quad (3.4)$$

$$i = i_r + i_c \quad (3.5)$$

$$U_s = R_2 i_r \quad (3.6)$$

$$i_c = C\dot{U}_s \quad (3.7)$$

$$U_{R_1} = R_1 i \quad (3.8)$$

Aplicando de 3.4 a 3.8 em 3.3:

$$U_e - [R_1(i_r + i_c)] = U_s$$

$$U_e - [R_1(\frac{U_s}{R_2} + C\dot{U}_s)] = U_s$$

$$R_1 C\dot{U}_s + \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} U_s = U_e \quad (3.9)$$

Segundo Doebelin (1990), qualquer instrumento que siga uma equação diferencial do tipo

$$a_1 \dot{q}_0 + a_0 q_0 = b_0 q_i$$

é, por definição, um instrumento de primeira ordem, onde:

- $a_0$ ,  $a_1$  e  $b_0$  são constantes,
- $q_i$  é um valor de entrada e
- $q_0$  é um valor de saída.

Portanto, a equação 3.9 mostra que o circuito elétrico escolhido configura um instrumento de primeira ordem.

Chamando o operador diferencial que está aplicado em  $U_s$  de  $D$ , dividindo a equação 3.9 pela constante  $a_0$  da mesma e colocando  $U_s$  em evidência, a equação 3.9 torna-se:

$$\left( \frac{R_1 R_2 C}{R_1 + R_2} D + 1 \right) U_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_e \quad (3.10)$$

Doebelin (1990) define o fator multiplicador que acompanha  $D$  (na equação 3.10) de  $\tau$  e o chama de *constante do tempo*:

$$\tau = \frac{R_1 R_2 C}{R_1 + R_2} \quad (3.11)$$

O fator que multiplica  $U_e$  em 3.10 é chamado de *sensibilidade estática*, sendo definido pela letra  $K$ :

$$K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.12)$$

A função transferência relaciona a entrada e saída de um sistema de medição. Essa relação é definida com a ajuda dos dois parâmetros anteriores (3.11 e 3.12) como sendo (Doebelin, 1990):

$$\frac{q_0}{q_i}(D) = \frac{U_s}{U_e}(D) = \frac{K}{\tau D + 1} \quad (3.13)$$

O  $D$  entre parêntesis simplesmente enfatiza que a função de transferência é uma relação geral entre  $q_0$  e  $q_i$  e não somente uma razão instantânea entre duas quantidades. Além disso, Doebelin (1990) prova que, para funções transferência senoidais, o operador  $D$  pode ser substituído por  $i\omega$ . Assim, a equação 3.13 torna-se a seguinte Função Resposta em Freqüência (DALLY, RILEY e McCONNELL, 1993):

$$\frac{q_0}{q_i}(i\omega) = \frac{U_s}{U_e}(i\omega) = \frac{K}{\tau i\omega + 1} \quad (3.14)$$

Sendo a equação 3.14 uma relação que situa-se no domínio dos números complexos, as respostas de tal equação podem ser analisadas nas formas de amplitude da razão entre entrada e saída ( $\frac{q_0}{q_i}$ ) e ângulo de fase ( $\phi$ ) dadas por:

$$\left| \frac{q_0}{q_i}(i\omega) \right| = \left| \frac{U_s}{U_e}(i\omega) \right| = \frac{K}{\sqrt{\tau^2 \omega^2 + 1}} \quad (3.15)$$

$$\phi = \angle \frac{q_0}{q_i}(i\omega) = \arctan(-\tau\omega) \quad (3.16)$$

Doebelin (1990) ilustra uma representação não-dimensional das equações 3.15 e 3.16 através do gráfico da Fig. 3.6.

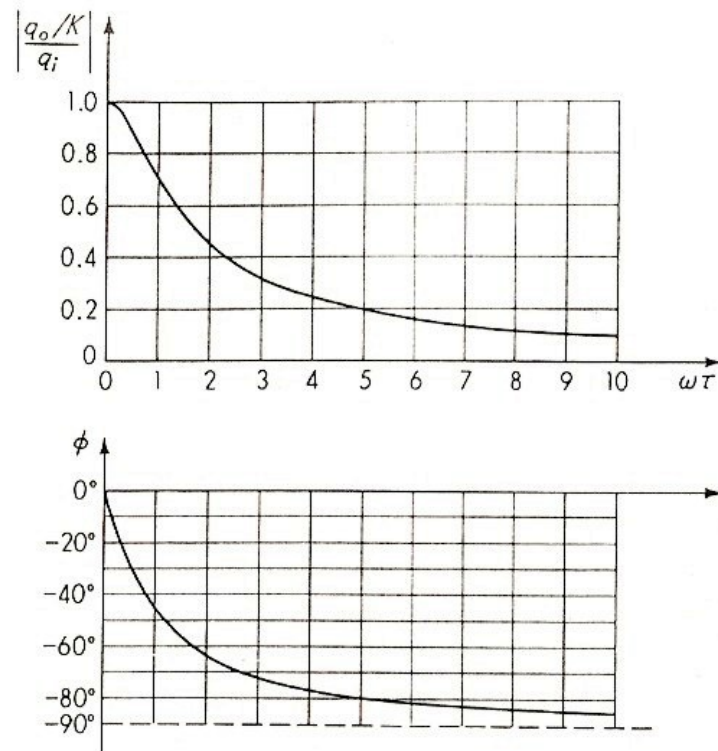


Figura 3.6 – Resposta em frequência de um instrumento de primeira ordem dada pelas equações 3.15 e 3.16 (Doebelin, 1990)

#### 3.4.1 Determinação da frequência de trabalho do circuito

Pelas informações obtidas da literatura, quanto mais alta a frequência, mais linear é o comportamento do teor de água com relação a constante dielétrica (ver item 2.4.1). No entanto, para atender aos Requisitos de Construção Custo e Robustez, é necessário que a fonte de geração de sinais seja de baixo custo e simples construção (o que geralmente não é observado em sistemas que trabalham a alta frequência).

Visando ao atendimento das condições anteriores e a determinação da frequência a ser utilizada, fez-se necessário o levantamento das curvas de resposta em frequência para o circuito utilizado. Neste item, considerou-se dois níveis de teor de água do milho próximos aos extremos da faixa de interesse: 10 a 30% de teor de água. Duas amostras foram preparadas atingindo os valores 11 e 26% de teor de água, considerados, aqui, como milho seco e úmido, respectivamente.

### 3.4.2 Simulação da resposta em frequência para o circuito utilizado

Como já mostrado no item 3.4, o circuito da Fig. 3.5 caracteriza um instrumento de primeira ordem. Seu comportamento é semelhante ao de um filtro passa-baixa. Sua resposta em função da frequência tem resposta equivalente ao mostrado na Fig. 3.6.

Este comportamento é, contudo, verificado para instrumentos que possuem a capacitância  $C$  constante. Neste caso, a capacitância varia em função do teor de água da semente que preenche o reservatório do sensor. Portanto, haverá uma curva resposta em frequência para cada teor de água a ser analisado. Isso mostra que o instrumento trabalhará não sobre uma curva, mas sim alternando de curva em curva para uma dada frequência fixa.

Para melhor compreensão desta etapa, foi feita uma simulação em *Matlab*<sup>®</sup> utilizando o desenvolvimento matemático para a Função Resposta em Frequência (FRF) desenvolvida no item 3.4, sendo usadas as equações descritas em 3.15 e 3.16.

Assim, foi necessária a determinação dos limites máximo e mínimo dos seguintes parâmetros relacionados às equações anteriores:  $R_1$  (resistor divisor de tensão),  $R_2$  (resistência elétrica interna do sensor construído) e  $C$  (capacitância interna do sensor construído). Os valores de  $R_2$  e  $C$  foram obtidos com o uso de duas amostras de milho (uma seca e uma úmida). O valor de  $R_1$  foi, inicialmente, fixado em  $10\text{ k}\Omega$ . Para a leitura de  $R_2$  foi utilizado um Megômetro Hewlett Packard HP 3054A conectado diretamente às extremidades de saída das placas interna e externas do sensor. A capacitância  $C$  foi conseguida com o auxílio de um capacímetro também ligado às extremidades das placas do sensor.

A umidificação do milho a 27% foi feita pela adição de certa quantidade de água aos grãos, com 24 horas para sorção. Foi feita a leitura de  $R_2$  e  $C$  com o sensor em três condições: vazio, cheio com milho seco (11% de teor de água) e milho úmido (27% de teor de água). Os valores de teor de água foram conseguidos com um medidor comercial Dickey-John<sup>3</sup>. Os dados estão mostrados na Tab. 3.1.

Dentro da faixa de 11 a 27 % de teor de água,  $R_2$  mostrou variação da ordem de  $\text{k}\Omega$  e  $C$  variou da ordem de milhares de  $\text{pF}$ . Também para o sensor vazio, a diferença de valores foi significativa (o valor de  $R_2$  para o sensor vazio extrapolou o limite máximo de leitura do

---

<sup>3</sup>Medidor indireto de umidade, portátil, marca Multi-grain<sup>®</sup> produzido pela Dickey-John

Tabela 3.1 – Valores de  $R_2$  e  $C$  para sensor vazio e cheio com milho seco e úmido

VAZIO		SECO (11%)		ÚMIDO (27%)	
$R_2$	$C$	$R_2$	$C$	$R_2$	$C$
acima de $1G\Omega$	$29pF$	$1G\Omega$	$88pF$	$380k\Omega$	$6500pF$

megômetro usado, sendo atribuído a este um valor acima de  $1 G\Omega$ ). Isso mostra que o modelo proposto (onde o sensor é modelado como sendo uma associação em paralelo de um resistor  $R_2$  e um capacitor  $C$ ) está em concordância com os dados observados, não podendo ser desprezado o efeito resistivo do sensor capacitivo.

A fim de observar o comportamento do modelo em função das capacitâncias (relacionadas aos valores de teor de água dos grãos-dielétricos) obteve-se as curvas<sup>4</sup> em função dos seguintes valores arbitrários (situados dentro dos limites mínimo e máximo de capacitância da Tab. 3.1): 29, 88, 300, 500, 700, 1000, 2000, 3000 e 6500 pF. Foram obtidos dois grupos de curvas, um grupo para  $R_1$  igual a  $10 k\Omega$  e outro para  $R_1$  igual  $100 k\Omega$ .  $R_2$  foi mantido em  $1 G\Omega$ . O domínio de frequência foi estabelecido de 0 a  $120 kHz$ . A Figura 3.7 mostra os resultados.

Observa-se que, tanto para o aumento dos valores de capacitância  $C$  como para o aumento dos valores do resistor divisor de tensão  $R_1$ , tem-se uma esperada diminuição da frequência de corte  $f_c$ , dada pela equação 3.17:

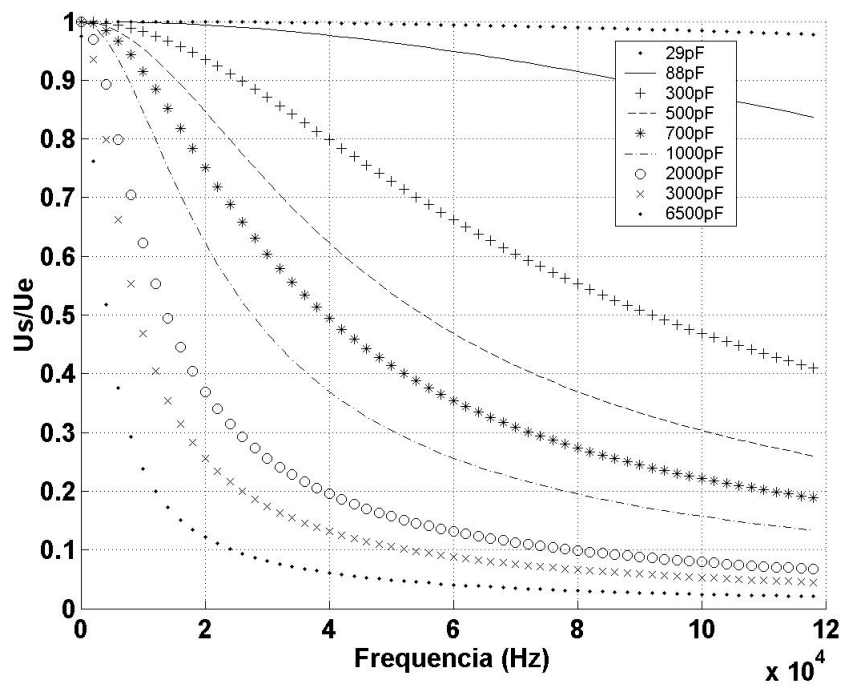
$$f_c = \frac{1}{R_1 C} \quad (3.17)$$

Desta forma, para cada amostra de sementes (com teores diferentes de água) colocada no sensor, ter-se-á uma leitura de tensão relacionada a uma curva qualquer, de frequência de corte  $f_c$ . Como o objetivo não é a obtenção de um filtro de frequências, a  $f_c$  não tem sentido prático neste trabalho. O que se deseja é a capacidade de leitura de diferentes valores de tensão de saída  $U_s$  em função dos valores de capacitância  $C$  de entrada.

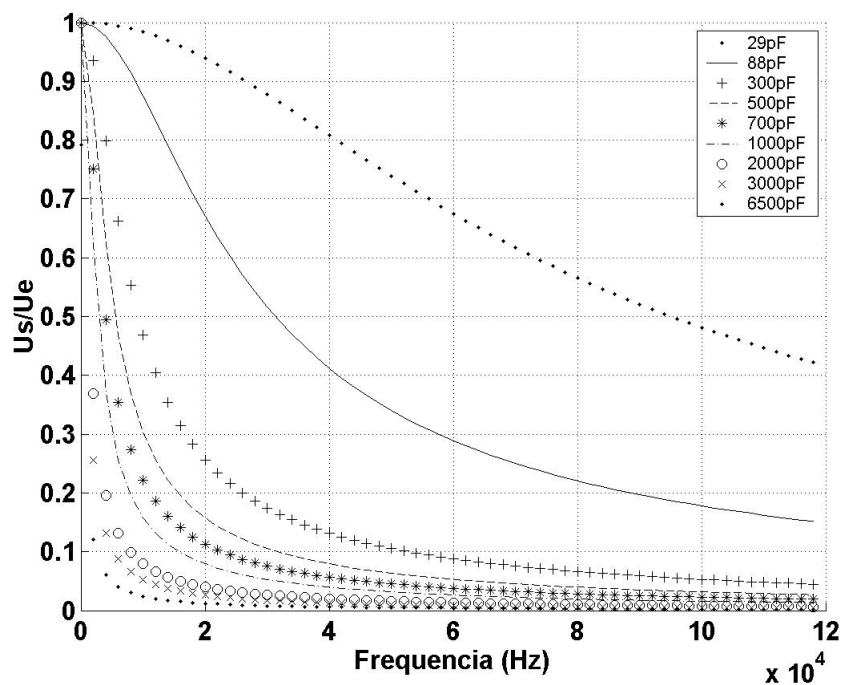
Para se atingir o objetivo descrito anteriormente, foi feita outra simulação<sup>5</sup> utilizando as equações 3.15 e 3.16, com valores de entrada  $R_2$  e  $C$  dados pela Tab. 3.1 e  $R_1$  igual a  $10 k\Omega$ . A Figura 3.8 mostra os resultados.

<sup>4</sup>via simulação MATLAB® - conforme PROGRAMA I do Apêndice III

<sup>5</sup>via MATLAB® - conforme PROGRAMA II do Apêndice III



(a)



(b)

Figura 3.7 – Simulação da amplitude da razão entre os sinais de saída  $U_s$  e entrada  $U_e$  para os seguintes valores de capacitância: 29, 88, 300, 500, 700, 1000, 2000, 3000 e 6500 pF ( $R_2$  constante igual a  $1\text{ G}\Omega$ ): (a)  $R_1$  igual a  $10\text{ k}\Omega$  (b)  $R_1$  igual a  $100\text{ k}\Omega$



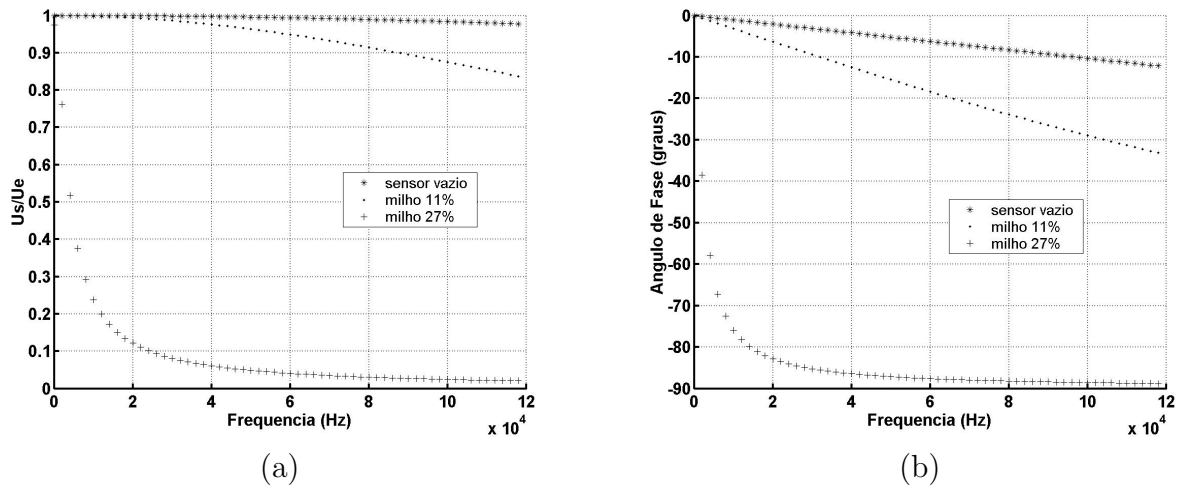


Figura 3.8 – Simulação da FRF para  $R_1$  igual a  $10 \text{ k}\Omega$ : (a) Amplitude da razão entre os sinais de saída  $U_s$  e entrada  $U_e$  (b) Ângulo de Fase entre os sinais de entrada  $U_e$  e saída  $U_s$

Sendo as curvas da Fig. 3.8 (a) obtidas a partir dos valores limites extremos de capacitância relacionados aos teores de água mínimo e máximo desejados (entre aproximadamente 11 e 27%), fica evidente que existe uma ampla faixa de frequências de onde pode-se escolher uma, em especial, para a construção do S.M.U.

Tanto mais sensível será o S.M.U. quanto maior for a diferença entre os valores  $U_s/U_e$  mínimo e máximo, referentes às capacitâncias mínima ( $88 \text{ pF}$ ) e máxima ( $6500 \text{ pF}$ ). Para frequências muito baixas esta diferença é cada vez menor, chegando a zero para a frequência  $f$  zero. Para valores intermediários e altos é possível determinar a  $f$  montando uma curva que mostre a relação entre a frequência e as diferenças entre  $U_s/U_e$  para milho seco ( $88 \text{ pF}$ ) e  $U_s/U_e$  para milho úmido ( $6500 \text{ pF}$ ). Este mesmo raciocínio aplica-se quando substitui-se  $R_1$  de  $10 \text{ k}\Omega$  por  $100 \text{ k}\Omega$  (Fig. 3.9).

Subtraindo  $U_s/U_e$  para milho seco ( $88 \text{ pF}$ ) de  $U_s/U_e$  para milho úmido ( $6500 \text{ pF}$ ) obtém-se a Fig. 3.10 ((a) -  $R_1$  igual a  $10 \text{ k}\Omega$  e (b) -  $R_1$  igual  $100 \text{ k}\Omega$ ). Nesta Figura fica claro que as frequências ideais para maior sensibilidade são: 40 a  $50 \text{ kHz}$  para  $R_1$  igual a  $10 \text{ k}\Omega$  e 3 a  $5 \text{ kHz}$  para  $R_1$  igual a  $100 \text{ k}\Omega$ .

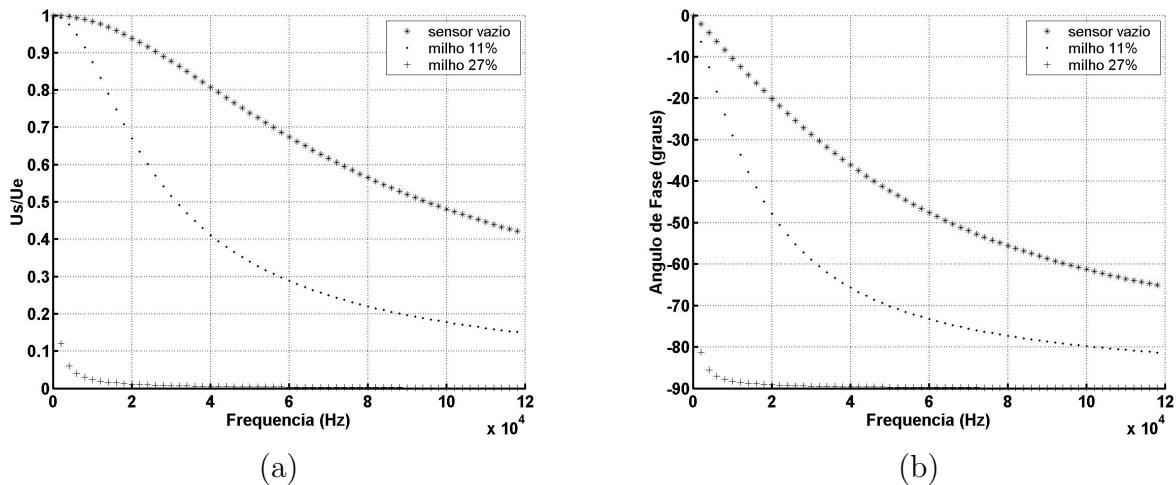


Figura 3.9 – Simulação da FRF para  $R_1$  igual a  $100 \text{ k}\Omega$ : (a) Amplitude da razão entre os sinais de saída  $U_s$  e entrada  $U_e$  (b) Ângulo de Fase entre os sinais de entrada  $U_e$  e saída  $U_s$

### 3.4.3 Resposta em frequência do sensor para milho seco e milho úmido

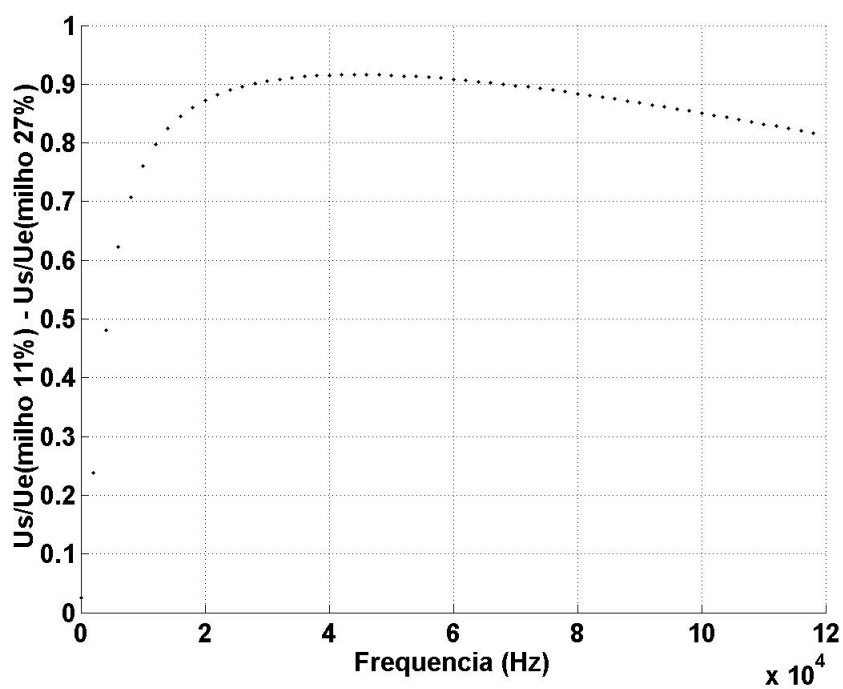
Utilizando as mesmas amostras de milho descritas no item 3.4.2, levantou-se alguns pontos da resposta em frequência do sensor para cinco níveis de frequência e dois valores de  $R_1$ .

A bancada experimental constituiu-se de um gerador de função Tektronix TM 503, o sensor mostrado no item 3.3, dois resistores de  $10 \text{ k}\Omega$  e  $100 \text{ k}\Omega$  ( $R_1$ ) e um osciloscópio Tektronix TDS 310 para medir a tensão de saída  $U_s$ . A tensão de entrada  $U_e$  foi definida em  $10,0 V_{ca}$  pico-a-pico senoidal.

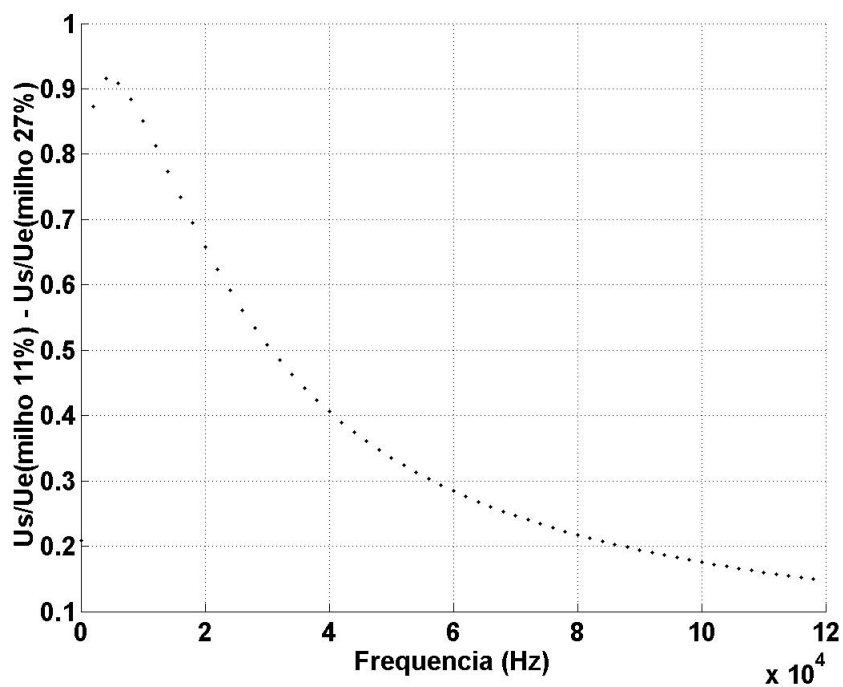
Fixada a amplitude em  $10,0 V$ , fez-se uma leitura de tensão para três condições: sensor vazio, sensor cheio com milho seco (11%) e sensor cheio com milho úmido (27%). Este procedimento foi repetido para valores de frequência dentro da faixa de zero a  $120 \text{ kHz}$  (conforme Tab. 3.2) e para os dois valores de resistores  $R_1$ . Os resultados estão mostrados na Tab. 3.2.

Também na Tab. 3.2 estão mostrados os valores obtidos da diferença entre as tensões de saída  $U_s$  para: *sensor vazio* e *sensor cheio com milho seco*; *sensor cheio com milho seco* e *cheio com milho úmido*. Tais diferenças podem ser comparadas com os valores das diferenças  $U_s/U_e$ , obtidos por simulação (Fig. 3.10). Para tanto, basta dividir os valores das diferenças entre  $U_s$  (mostrados na Tab. 3.2) pela  $U_e$  (igual a  $10,0 V$ ) e organizar os resultados em um gráfico função da frequência (Fig. 3.11).

A simulação empregada (Fig. 3.10) mostrou-se adequada para o circuito elétrico



(a)



(b)

Figura 3.10 – Simulação da diferença entre  $U_s/U_e$  para milho seco ( $88 \text{ pF} - 11\%$ ) e  $U_s/U_e$  para milho úmido ( $6500 \text{ pF} - 27\%$ ) quando submetido a uma  $U_e$  igual a  $10 \text{ V}$  pico-a-pico senoidal: (a)  $R_1$  igual a  $10 \text{ k}\Omega$  (b)  $R_1$  igual a  $100 \text{ k}\Omega$

Tabela 3.2 – Levantamento experimental das faixas de sensibilidade do sensor de umidade

$f$ (kHz)	$R_1$ (k $\Omega$ )	$U_s$ ( $V_{pico-a-pico}$ )			Diferenças entre $U_s$ para: ( $V_{pico-a-pico}$ )		
		Vazio	11%	27%	Vazio e 11%	11% e 27%	Vazio e 27%
5,0	10	9,96	9,86	7,38	0,10	2,48	2,58
	100	8,67	8,00	2,04	0,67	5,96	6,63
10,0	10	9,92	9,85	7,22	0,070	2,63	2,70
	100	7,73	6,81	1,66	0,92	5,15	6,07
40,0	10	9,61	9,30	5,14	0,31	4,16	4,47
	100	3,53	2,88	0,880	0,65	2,00	2,65
70,0	10	9,15	8,56	4,56	0,59	4,00	4,59
	100	2,14	1,74	0,672	0,40	1,07	1,47
100,0	10	8,32	7,68	4,32	0,64	3,36	4,00
	100	1,50	1,24	0,608	0,26	0,63	0,890

estudado, podendo ser confirmado pela comparação com os gráficos da Fig. 3.11, onde observa-se um comportamento equivalente das curvas em função da frequência.

A experimentação confirmou as faixas de frequência

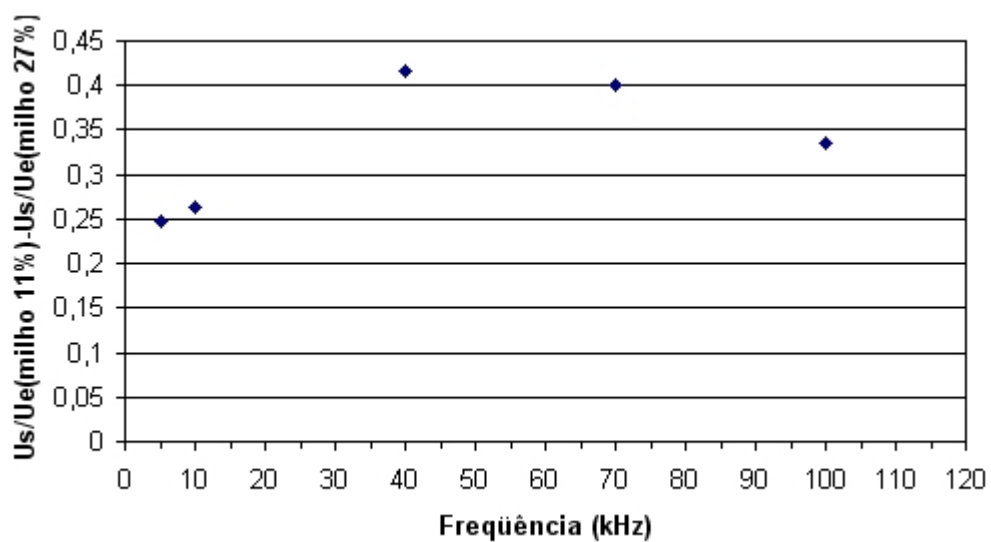
- (40 a 50) kHz para  $R_1$  igual a 10 k $\Omega$  e
- (3 a 5) kHz para  $R_1$  igual a 100 k $\Omega$

(definidas no item 3.4.2) como sendo as mais adequadas para se obter uma calibração com maior diferença de amplitude entre os valores máximo e mínimo de tensão de saída  $U_s$  em função dos valores limite de teor de água do milho (faixa que compreende o mínimo e máximo de teor de água a ser lido pelo S.M.U.).

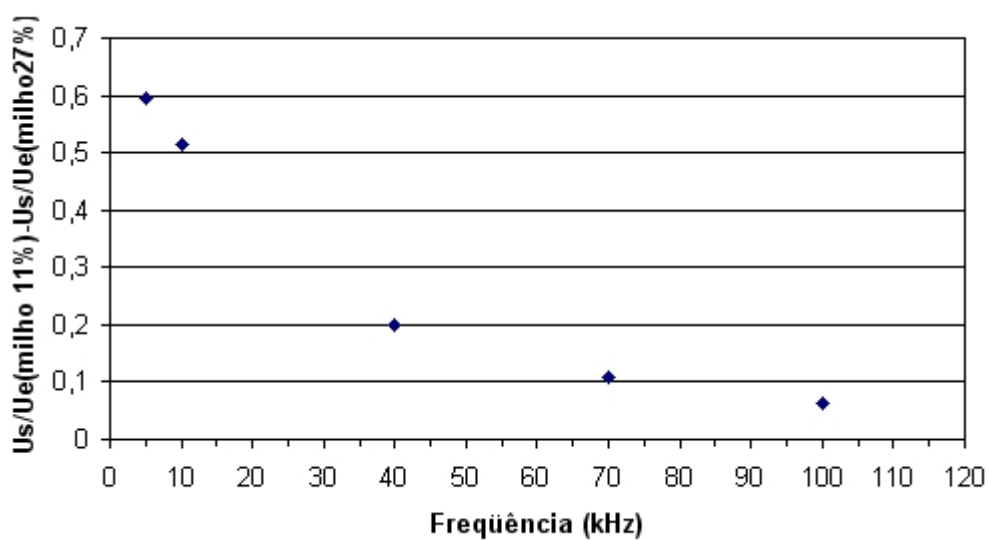
Apesar da equivalência na forma das curvas mostradas nas Fig. 3.10 e 3.11, a amplitude das diferenças de  $U_s$  apresentaram grandes diferenças. Acredita-se que esta discordância é devida ao fato de o gráfico da simulação ter mostrado apenas o módulo do modelo proposto (sendo este um modelo inserido no conjunto dos números complexos). Assim, a diferença de fase não foi incluída ao passo que esta é parte indissociável dos valores obtidos na experimentação.

Com o objetivo de se determinar um valor de frequência (e não uma faixa) para ser usado na calibração do sistema, tomou-se como parâmetro de escolha o maior valor de diferença de  $U_s$  para milho 11 % e 27 % mostrados na Tab. 3.2. Esse fato determinou a frequência de 5 kHz para  $R_1$  igual a 100 k $\Omega$ , onde  $U_s$  é máximo no valor de 5,96  $V_{ca}$  pico-a-pico.

No entanto, este não pode ser o único parâmetro de escolha visto que a diferença de  $U_s$  para milho vazio e 11 % não pode ser desprezível. Caso isso ocorra, no processo de calibração,



(a)



(b)

Figura 3.11 – Valores experimentais da diferença entre  $U_s/U_e$  para milho seco (11 %) e  $U_s/U_e$  para milho úmido (27%) em função da frequência quando submetido a uma  $U_e$  igual a 10 V pico-a-pico senoidal: (a)  $R_1$  igual a 10 k $\Omega$  (b)  $R_1$  igual a 100 k $\Omega$

o S.M.U. não será capaz de distinguir se o sensor está vazio ou com milho muito seco. Desta forma, foi escolhida frequência de  $10\text{ kHz}$  para  $R_1$  igual a  $100\text{ k}\Omega$  visto que esta apresenta a maior diferença entre milho a  $11\%$  e sensor vazio (Fig. 3.12).

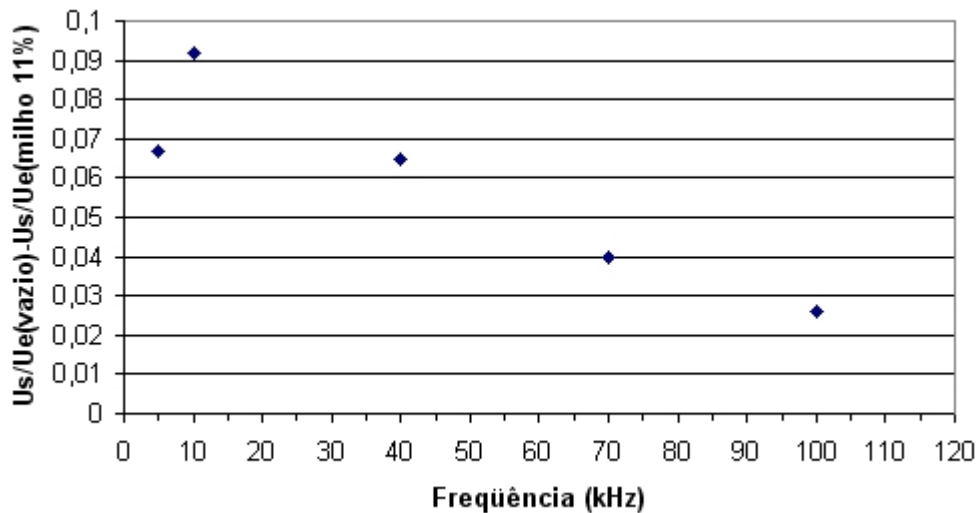


Figura 3.12 – Diferença entre  $U_s/U_e$  para sensor vazio e  $U_s/U_e$  para milho seco ( $11\%$ )

#### 3.4.4 Síntese dos resultados obtidos

Do exposto nos itens anteriores, concluiu-se que:

- O circuito do sensor de umidade deve trabalhar com uma onda senoidal de frequência  $10\text{ kHz}$ ;
- O resistor divisor de tensão  $R_1$  deve ser de valor  $100\text{ k}\Omega$ .

Portanto, estes resultados serão utilizados para o projeto do circuito eletrônico, descrito a seguir.

### 3.5 Construção do circuito eletrônico do sensor

O circuito elétrico básico utilizado no sensor de umidade foi analisado no item 3.4. Tal estudo foi feito com o auxílio de equipamentos de laboratório, como osciloscópio e gerador de funções, para determinação de suas características básicas.

Estuda-se agora a implementação de um circuito eletrônico para o sensor, de modo que o S.M.U. possa trabalhar em uma colhedora. Deste modo, suas principais funções devem contemplar:

- a geração de onda senoidal com frequência de  $10\text{ kHz}$  e amplitude  $10\text{ V}$  pico-a-pico;
- a retificação do sinal de saída do sensor e
- a regulagem de amplitude do sinal retificado para níveis próximos a cinco volts.

Portanto, o circuito deve conter três módulos: gerador de sinal senoidal, retificador e regulador de tensão.

Para o circuito gerador de sinal senoidal foi escolhido o circuito integrado (C.I.) *XR-2206 CP* fabricado pela *EXAR*. Trata-se de um gerador de função de uso geral, muito comum e de fácil aquisição. Algumas de suas características principais são:

- Tensão máxima de alimentação:  $\pm 13\text{ V}_{cc}$ ;
- Máxima frequência de operação:  $1\text{ MHz}$ ;
- Temperatura de operação:  $0$  a  $70^\circ\text{C}$ .

A retificação do sinal de saída foi conseguida com o uso do amplificador operacional (A.O.) *LM-358N* fabricado pela *ST Microeletrônica*, associado a um circuito elétrico auxiliar composto de diodos, resistores e um capacitor eletrolítico. A operação de regulagem do sinal retificado é feita neste mesmo (A.O.) com a ajuda de um resistor variável de  $200\text{ k}\Omega$ . Tal circuito obedeceu ao esquema apresentado por Berlin (1983). Suas principais características são:

- Tensão máxima de alimentação:  $\pm 16\text{ V}_{cc}$ ;
- Temperatura de operação:  $0$  a  $70^\circ\text{C}$ .

A regulagem de amplitude do sinal retificado é conseguido com o uso de um resistor variável acoplado às saídas próprias do C.I. *XR-2206 CP*. Isto permite a variação de amplitude do sinal senoidal gerado implicando na variação do sinal retificado. É importante que o sinal retificado seja da ordem de  $5\text{ V}$  pois é o valor máximo de leitura da placa A/D do controlador.

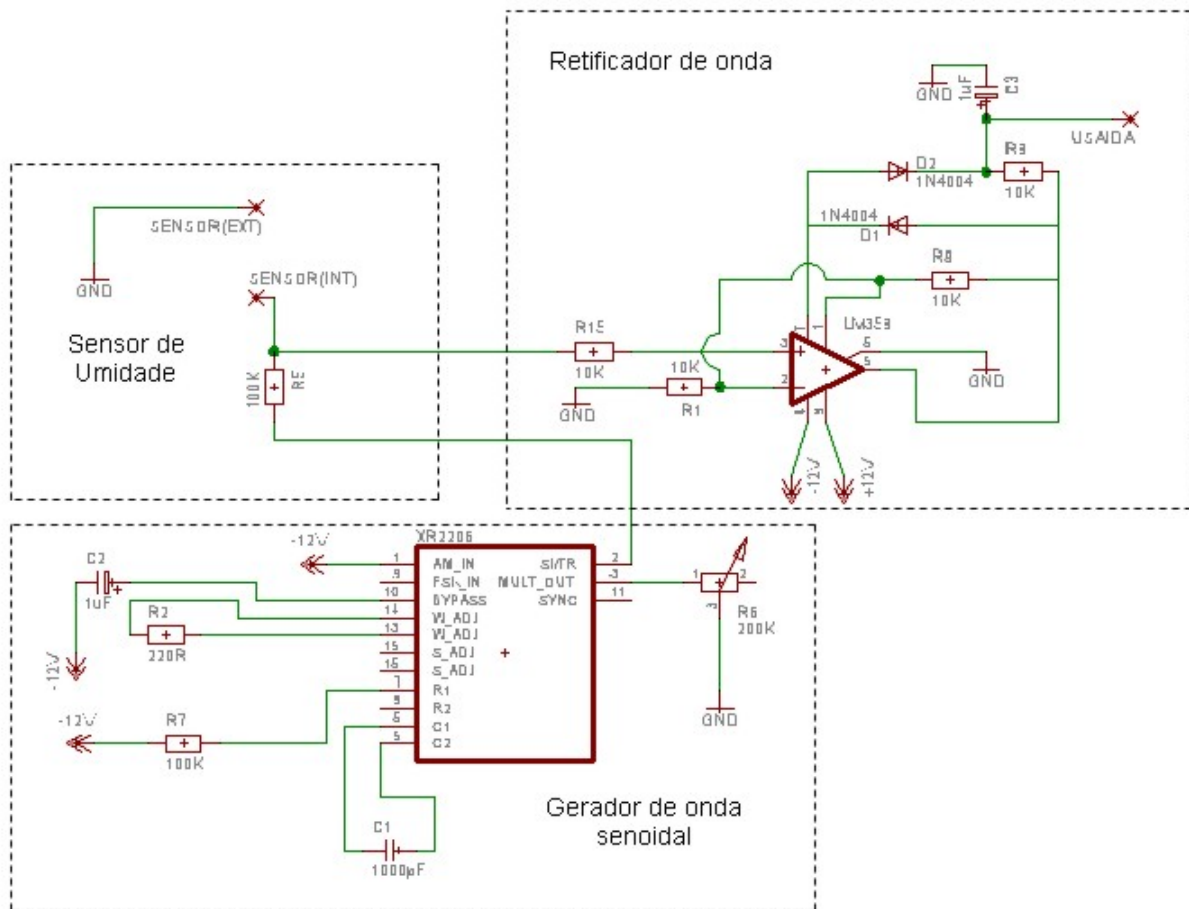


Figura 3.13 – Projeto do circuito eletrônico do sensor de umidade

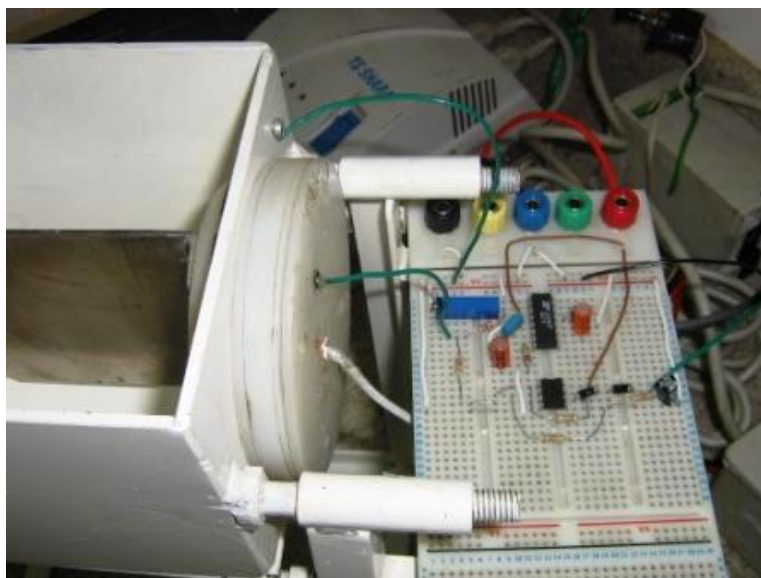


Figura 3.14 – Circuito eletrônico montado em um *protoboard*



A Figura 3.13 mostra o projeto do circuito eletrônico. Todo o circuito foi montado e testado para chegar à sua configuração final conforme a Fig 3.14.

### 3.6 Módulos do S.M.U. e testes preliminares

Neste item é feita a escolha dos módulos descritos no item 3.2, mostrada a configuração final do S.M.U. e descrito os testes preliminares necessários para a calibração do sistema.

#### 3.6.1 Escolha dos módulos constituintes do S.M.U.

Visando atender ao **RC-07** foram escolhidos no mercado módulos de alimentação comuns e de fácil aquisição, a saber: Fonte conversora  $110 V_{ac}/\pm 12V_{cc}$  comercial e inversor de frequência estabilizado, responsável pela conversão de  $12 V_{cc}$  em  $110 V_{ac}$ .

Com relação ao C.L.P., existem várias alternativas no mercado. Desde os mais sofisticados, com linguagens de programação bastante flexíveis, até os mais simples que podem ser programados diretamente no controlador. Optou-se pelo ZAP 500 da HI Tecnologia Ltda. O principal motivo desta escolha foi o custo de aquisição. Apesar de não ser um controlador de recursos avançados, atende aos propósitos deste trabalho. Utiliza a forma de linguagem de programação por diagrama de contatos<sup>6</sup>, comum a vários controladores comerciais, o que viabiliza uma fácil migração para outras marcas. Outra vantagem é o ambiente de programação, oferecido gratuitamente pela fabricante. Suas principais características técnicas são:

- Alimentação 10 a  $38 V_{cc}$
- Temperatura de operação 0 a  $65 ^\circ C$
- Oito canais de entrada analógica (placa A/D - Analógico/Digital) para sinais de 0 a  $5 V_{cc}$

A Figura 3.15 mostra a configuração final do S.M.U. montado e operacional.

---

<sup>6</sup>Também conhecida como programação *LADDER*, conforme salienta Silveira e Santos (1998)

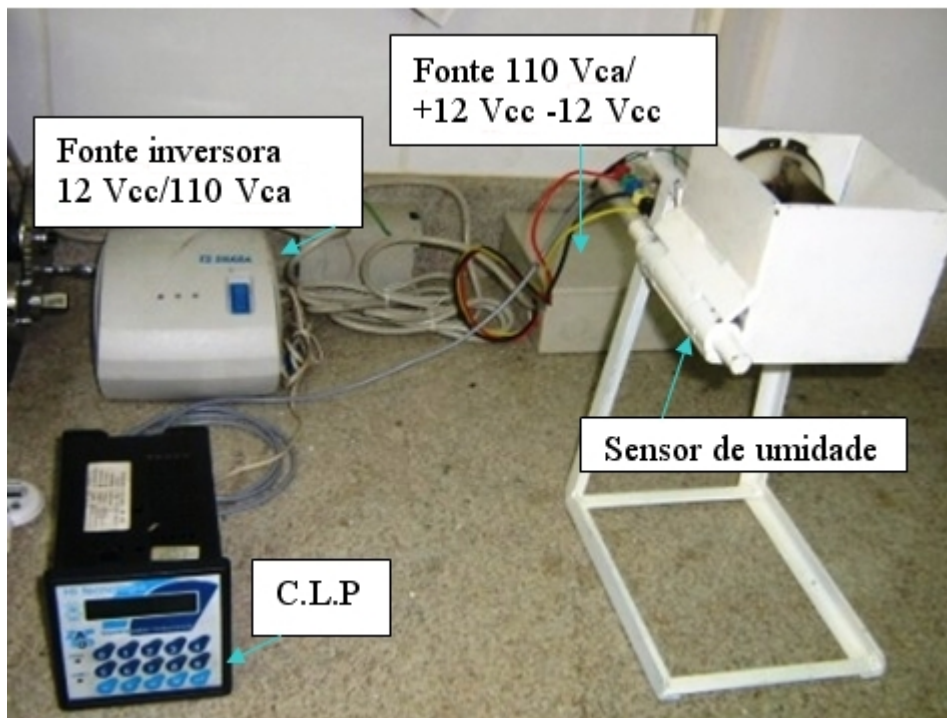


Figura 3.15 – Configuração final do protótipo do S.M.U.

### 3.6.2 Aferição da placa A/D do Controlador Lógico Programável

A placa A/D do C.L.P. recebe o sinal de saída  $U$  do circuito eletrônico do sensor e o converte para um sinal digital que é mostrado na tela do controlador. A entrada analógica recebe sinais de tensão de 0 a 5  $V_{cc}$  e os converte em valores inteiros de 0 a 4.092.

A fim de utilizar o próprio C.L.P. como voltímetro na calibração do sistema, foi feita sua programação para que o fundo de escala 5  $V_{cc}$  equivalesse ao valor 4.092. Desta forma a tela do C.L.P. mostrará os valores de tensão na entrada da placa A/D.

Assim, foi feita uma aferição do C.L.P. na qual utilizou-se uma fonte de sinal constante, marca EMG 18131, como gerador de tensão 0 a 5  $V_{cc}$ , conectado à entrada da placa A/D. Nesta mesma fonte foram conectadas as pontas de prova de um osciloscópio TEKTRONIX TDS 310, usado como equipamento de referência na aferição. Valores de 0 a 5  $V_{cc}$ , com variação de um em um Volt, foram gerados na entrada da placa A/D e comparados às leituras feitas pelo osciloscópio. A Tabela 3.3 e a Fig. 3.16 mostram os resultados.

Pela Tabela, observa-se que o erro acontece na segunda casa decimal, o que é perfeitamente aceitável para os propósitos deste trabalho. Assim, na etapa de calibração, será usado o próprio C.L.P. como leitor de tensão.

Tabela 3.3 – Valores médios obtidos da aferição do C.L.P.

<i>Tensão Nominal (V)</i>	<i>Osciloscópio (V)</i>	<i>C.L.P. (V)</i>	<i>Erro (%)</i>
0	0,002	0,01	80,00
1	1,017	1,02	0,29
2	1,997	2,01	0,65
3	3,023	3,02	0,10
4	4,007	4,03	0,57
5	4,961	4,96	0,02

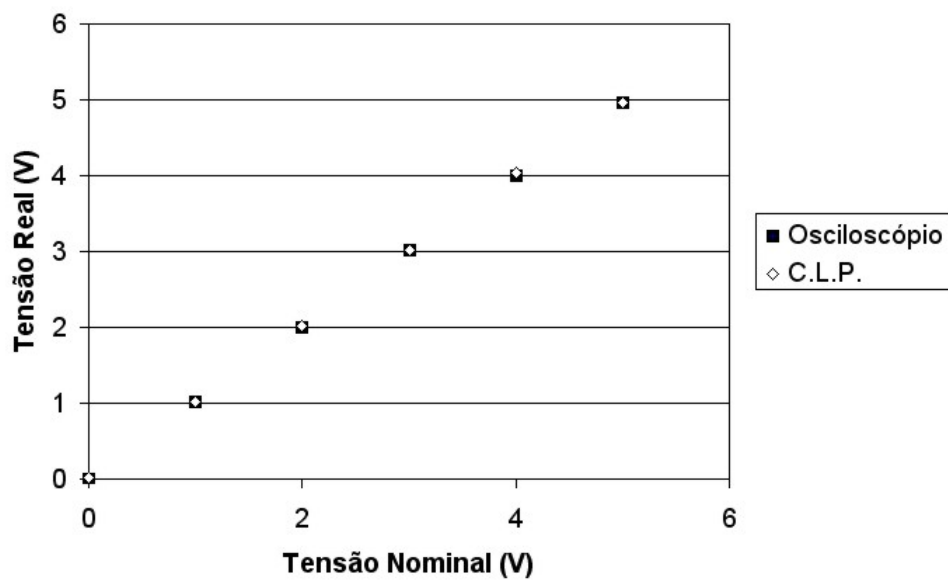


Figura 3.16 – Aferição da placa A/D do C.L.P.

### 3.6.3 Determinação da tensão $U_{vazio}$ para sensor vazio

Quando o sensor estiver na condição vazio (sem sementes), será fornecido pelo seu circuito eletrônico um valor de tensão de saída  $U$ . Este valor deve ser constante para qualquer S.M.U. construído posteriormente, de modo que, realizada a calibração para um tipo de semente, esta seja aplicável.

O critério para seleção da tensão em vazio do sensor foi o limite superior de leitura de tensão da placa A/D do C.L.P. utilizado. A placa A/D realiza leituras de tensão contínua de 0 a  $5 V_{cc}$ . Definiu-se o valor de  $5,10 V$  como tensão de saída  $U$  do sensor. Este valor foi chamado de tensão em vazio do sensor  $U_{vazio}$ , sendo regulado através do resistor variável do circuito eletrônico da Fig. 3.14. Assim, sempre que o sensor estiver vazio, a placa A/D do C.L.P. não fará a leitura de tensão, podendo ser inserida, por exemplo, uma mensagem de "sensor vazio".

# CAPÍTULO IV

## CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE

Capítulo dedicado à calibração do sensor de umidade. Foi proposto um planejamento experimental para determinar a influência da temperatura e densidade como fontes de erro na leitura do teor de água. Posteriormente, são propostos e testados dois procedimentos para umedecimento das amostras de sementes a serem usadas na calibração. Em seguida, são descritos o procedimento experimental, resultados e discussão, terminando com as principais constatações acerca da calibração executada.

### **4.1 Estudo da influência da temperatura e densidade de uma amostra de sementes sobre a tensão de saída $U$ do sensor de umidade**

Como mostrado no item 2.4 do Capítulo 2, as propriedades dielétricas de um material qualquer variam principalmente em função:

- do teor de água presente no material;
- da frequência do campo elétrico alternado aplicado;
- da temperatura do material analisado;
- da densidade do material e sua forma de apresentação (granulado, particulado etc).

O teor de água presente no material é o efeito de interesse deste trabalho, através do qual será feita a calibração do sensor. A frequência do campo elétrico foi fixada em  $10kHz$ , conforme critérios descritos no item 3.4. Deste modo, este fator não tem efeito sobre  $U$ . Restam a temperatura do material e sua densidade com possíveis efeitos sobre o S.M.U.

Para caracterização de tais efeitos, foi montado e executado um planejamento fatorial a dois níveis ( $2^2$ ), com repetição, conforme os procedimentos descritos por Neto, Scarminio e Bruns (2003). Os fatores são Temperatura e Densidade da amostra de sementes. Todas as amostras foram retiradas de um lote de um mesmo material fornecido por uma empresa de pesquisa de sementes cujo teor de água médio das sementes estava em 11,4%. As sementes foram classificadas pelo formato (largura e comprimento do mesmo material) conseguindo-se sementes redondas (R) e chatas (Ch). A forma da semente foi responsável pela variação da densidade da amostra dentro da cuba sensora do S.M.U. Como o volume da cuba sensora é constante, a variação de densidade é observada pela leitura direta da massa da amostra, sendo usada a unidade  $g$  (grama) para descrever o efeito Densidade.

Os níveis de cada fator estão mostrados na Tab. 4.1. Tais temperaturas foram escolhidas pois englobam uma faixa comum de temperatura em que são feitas as colheitas no Brasil. Os níveis de densidade são aqueles descritos no parágrafo anterior.

Tabela 4.1 – Planejamento fatorial a dois níveis

Fatores	(-)	(+)
1: Temperatura ( $^{\circ}C$ )	10	45
2: Densidade (g)	R	Ch

As temperaturas de 10 e  $45^{\circ}C$  foram atingidas com o uso de uma câmara de acondicionamento B.O.D. (*Biological Oxygen Demand*) e medidas por um termômetro digital no interior da mesma. Apenas o sensor de umidade com as sementes foram mantidos dentro da B.O.D., sendo que o controlador, voltímetro e demais sistemas foram utilizados em temperatura ambiente. Deste modo, durante os experimentos, não apenas as sementes permaneceram expostas à temperatura selecionada mas também o sensor de umidade. A Figura 4.1 mostra a bancada experimental montada.

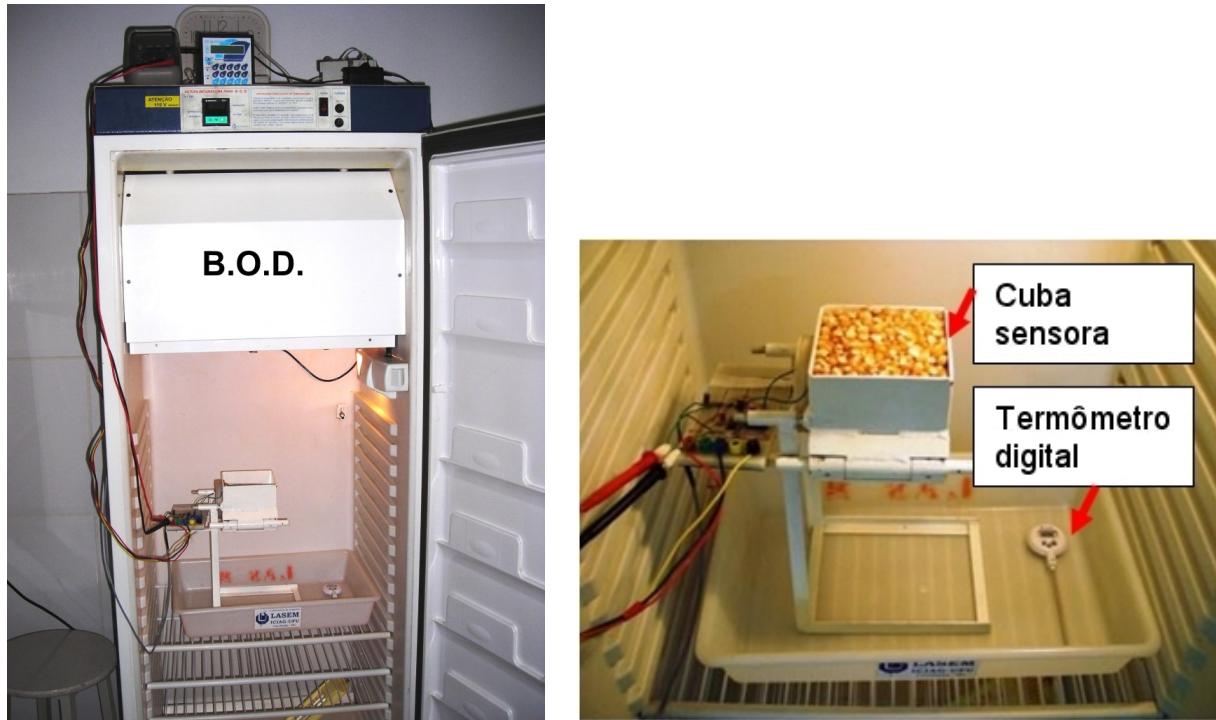


Figura 4.1 – Bancada experimental para determinação da influência da temperatura e densidade de uma amostra de sementes sobre a tensão de saída  $U$  do S.M.U.

Para cada nível de temperatura (configurado na B.O.D.) foi realizado um ensaio, com repetição. Cada amostra de milho foi mantida dentro do sensor, no interior da B.O.D., por um período de 30 a 40 min para cada ensaio, permitindo que o equilíbrio térmico fosse atingido. Alcançado o tempo de espera, eram feitas as leituras de tensão  $U$ , massa de cada amostra (a fim de mostrar que os níveis (R) e (Ch) apresentavam diferentes densidades) bem como a leitura de tensão em vazio  $U_{vazio}$  visando certificar que não houve variação significativa deste último parâmetro. A Tabela 4.2 mostra os resultados de  $U_{vazio}$  e massas medidas.

Tabela 4.2 – Variação da Tensão em vazio e Massa para o planejamento fatorial a dois níveis (D.P. - Desvio Padrão)

Ensaio	Fator 1	Fator 2	$U_{vazio}$ (V)	Média (V)	Massa (g)	Média (g)	D.P.
1	-	-	5,61	5,60	791,0	792,9	5,0
2	+	-	4,56	4,63	792,1	801,9	
3	-	+	5,68	5,60	841,6	810,6	12,8
4	+	+	4,65	4,65	829,7	828,1	

Da Tabela, verifica-se a influência da Temperatura na  $U_{vazio}$ . Mantendo a densidade no nível (R) ou (Ch), observa-se uma queda de tensão de aproximadamente 1V quando a Tem-

peratura é elevada do nível baixo ao nível alto. Este é um resultado importante (e não esperado) pois mostra que a Temperatura tem efeito não somente sobre as propriedades dielétricas da semente mas também sobre o S.M.U. proposto neste trabalho.

Com relação à densidade, o nível (Ch) apresenta-se 33g mais pesado que o nível (R), o que equivale a dizer que existe 33g a mais de massa dentro do volume da cuba sensora no nível (Ch) em relação ao (R).

A matriz de planejamento é apresentada na Tab. 4.3 juntamente com as tensões  $U$  obtidas nos experimentos. Os ensaios foram feitos com repetição e em ordem aleatória, conforme mostrado pelos números em parênteses na tabela. Como cada ensaio foi feito com repetição, foi possível determinar se os efeitos são estatisticamente significativos.

Tabela 4.3 – Tensões de Saída ( $U$ ) respostas para o planejamento fatorial a dois níveis

Ensaio	Temperatura	Densidade	Respostas ( $V$ )		Média
1	-	-	5,37 (3)	5,32 (2)	5,35
2	+	-	4,28 (5)	4,32 (8)	4,30
3	-	+	5,47 (1)	5,45 (4)	5,46
4	+	+	4,32 (6)	4,32 (7)	4,32

A Tabela 4.4 contém os resultados da análise dos dados da Tab. 4.3. De todos os efeitos, apenas os principais são estatisticamente significativos (verificado pela construção dos intervalos de confiança a 95%, apresentados entre parênteses na Tab. 4.4). O efeito de interação Temperatura-Densidade não se apresenta significativo com 95% de confiança.

Para a interpretação dos resultados, foi traçado um diagrama contendo as respostas médias em todas as combinações de níveis das variáveis, como mostrado na Fig. 4.2. Examinando o diagrama constata-se que:

1. Elevando a Temperatura ocorre uma queda de Tensão da ordem de  $1V$ ;
2. Trocando a Densidade de (R) para (Ch) existe um aumento da Tensão da ordem de  $0,1V$ ;
3. Não existe efeito de interação estatisticamente significativo entre Tensão e Densidade;



Tabela 4.4 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial a dois níveis

Média global:	$4,86 \pm 0,01$	(4,83 4,88)
Efeitos principais:		
T	$-1,10 \pm 0,02$	(-1,14 -1,05)
D	$0,07 \pm 0,02$	(0,02 0,1)
Efeito de interação:		
TD	$-0,05 \pm 0,02$	(-0,09 0,002)

- O efeito da Temperatura na Tensão de saída do S.M.U. é dez vezes maior em ordem de grandeza que o efeito da Densidade;
- O maior efeito da Densidade (aumento da tensão de saída  $U$  em  $0,11 V$  para a Temperatura de  $10\text{ }^{\circ}C$ ) corresponde a uma variação de cerca de 2% na tensão de saída em vazio  $U_{vazio}$  do sensor de umidade.

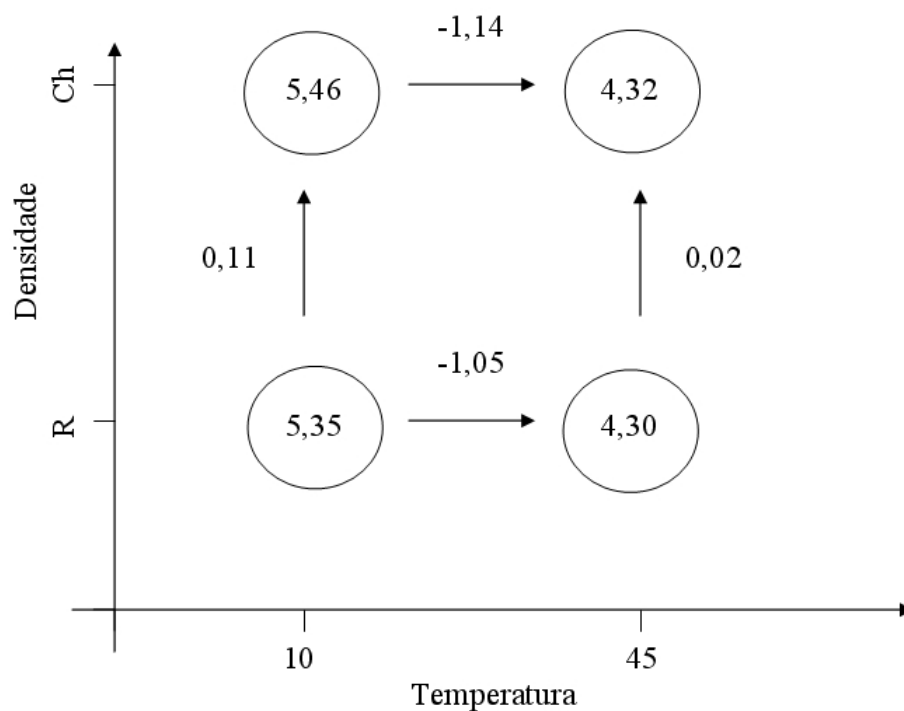


Figura 4.2 – Diagrama para interpretação dos resultados do planejamento fatorial a dois níveis

Baseado nas constatações acima, é possível concluir que o efeito prático final que interferirá na leitura de teor de água do S.M.U. (na forma de erro) é a Temperatura de colheita da semente. Como não foi feito um estudo delimitador do efeito da Temperatura na  $U$  e na  $U_{vazio}$  separadamente, o efeito observado acima é a somatória do efeito próprio da Temperatura nas propriedades dielétricas do material mais o efeito no sensor de umidade vazio (sem sementes). Sendo o efeito somado (aproximadamente 1 V) da mesma ordem de grandeza do efeito da Temperatura no sensor vazio (também 1 V), pode-se inferir que a temperatura tem maior efeito sobre o sensor de umidade construído que sobre as propriedades dielétricas dos grãos. Com relação à densidade, esta será desconsiderada como fonte de interferência no sensor visto que sua influência é da ordem de 2 % da tensão de saída do sensor vazio ( $U_{vazio}$  igual a 5,10 V). Adicionalmente, o planejamento experimental foi feito com sementes classificadas pela forma: redondas (R) e chatas (Ch). Esta condição não acontece em uma colheita de parcelas onde as sementes são analisadas no sensor de umidade com uma mistura aleatória de formas.

#### **4.2 Pré-teste para determinação da metodologia de umidificação das amostras de sementes**

O primeiro passo para calibração do sensor construído é conseguir várias amostras de um mesmo lote de sementes com diferentes níveis de teor de água. Dois métodos foram testados para escolha do mais adequado. O primeiro avaliado é descrito a seguir.

O princípio utilizado foi manter as amostras de sementes em um ambiente com o maior nível possível de umidade relativa do ar. Desta forma, esperava-se que a semente absorvesse a umidade do meio, até seu limite máximo, da maneira mais natural possível. Para tanto, uma pequena mesa com tampo de tela foi construída para receber as sementes. Colocada dentro de um recipiente plástico, esta tela manteve as sementes acima de uma lâmina de água (contida no fundo do recipiente). O recipiente foi fechado e colocado em uma B.O.D. a 50 °C. A função da alta temperatura foi promover a aceleração do processo de absorção da água pela semente. O material da tela era de aço inoxidável e sua estrutura de alumínio. A Figura 4.3 mostra a tela construída e o conjunto montado.

A primeira amostra constituiu-se de milho a 12 % de teor de água com volume suficiente



Figura 4.3 – Conjunto com tela para umidificação de sementes: (a) mesa com tampo de tela (b) mesa com tampo de tela, preenchida com soja e montada em recipiente plástico

para encher o reservatório do sensor. Esta amostra foi colocada na B.O.D. e deixada por 24 horas. Após este tempo o teor de água subiu para apenas 16%. Uma amostra de soja também foi submetida às mesmas condições porém o tempo de espera foi de quatro dias. O teor de água atingido foi de 22 %.

Dado o longo tempo de espera e o baixo teor de água conseguido com o procedimento descrito anteriormente, partiu-se para outro método: a embebição entre camadas de papel de germinação umedecido. Consistiu em intercalar camadas de milho em folhas de papel de germinação embebidas em água destilada (garantindo a pureza da água). O volume de milho utilizado em cada amostra foi de aproximadamente 1.100 *ml*, o suficiente para preencher o reservatório do sensor de umidade. Cada amostra foi montada em bandeja plástica e colocada dentro da câmara fria à temperatura constante de 10 °C. Neste caso, a temperatura foi mantida baixa a fim de retardar a germinação da semente devido a maior disponibilidade de água (com conseqüente maior rapidez na absorção).

Para avaliação deste método, três amostras de milho receberam diferentes volumes de água. Em função do volume de milho, utilizou-se três camadas de sementes intercaladas por folhas de papel de germinação entre cada camada. Cada amostra foi distribuída em camadas iguais, o suficiente para cobrir a área do papel de germinação (Fig. 4.4), garantindo a distribuição mais uniforme da água e favorecendo a absorção pelas sementes.

O volume de água adicionado por amostra foi o máximo, até o limite do não encharca-



Figura 4.4 – Amostra de milho para umidificação: uma camada de milho entre duas folhas de papel de germinação

mento. Após 24h, foi medido o teor de água pelo medidor G 800. Tal procedimento foi repetido até que se alcançasse o valor de teor de água desejado. O objetivo foi obter três amostras de milho com diferentes teores de água, compreendidos na faixa de interesse do estudo, entre 11 e 30% de teor de água. A primeira adição de água foi feita com os seguintes volumes para as três amostras de milho: 60, 80 e 100ml. A Tabela 4.5 mostra os teores de água conseguidos após 24h e a repetição do procedimento até se alcançar o teores desejados.

Tal método mostrou-se adequado para os objetivos deste trabalho, sendo adotado para a calibração do S.M.U.

Tabela 4.5 – Procedimento para umidificação de sementes milho

		Primeira adição	24 horas	48 horas
Amostra 01	adição água (ml)	60	60	0
	teor de água atingido (%)	12,7	19,7	19,7
Amostra 02	adição água (ml)	80	80	60
	teor de água atingido (%)	13,5	20,9	25,0
Amostra 03	adição água (ml)	100	100	100
	teor de água atingido (%)	14,6	22,8	31,4

### 4.3 Procedimento experimental para umidificação das sementes através do embebi-mento com água

Seis amostras de milho (Fig. 4.5), de aproximadamente 1.100 ml em volume cada uma, foram separadas para serem preparadas conforme a metodologia definida no item 4.2. As amostras foram extraídas de um lote de milho Híbrido Duplo, peneira 22, safra 2006/2006, sem tratamento contra pragas, fornecido pela Primaiz Sementes. Tomou-se como teores alvo de água os seguintes valores: 10, 15, 20, 25, 30 e 35 %, perfazendo todo o domínio de teores de água desejado. O teor inicial de todas as amostras estava em torno de 12 %, medida através do medidor de umidade G 800.



Figura 4.5 – Amostras de milho para umedecimento

Para as amostras de teor alvo de água de 15 a 35 %, foram adicionados volumes definidos de água destilada. Esses volumes eram adicionados às amostras em quantidade proporcional ao teor-alvo desejada para cada amostra. O tempo de espera para a absorção da água pelas sementes foi de 24h, acondicionadas em câmara fria a 10 °C, sendo que, após este intervalo, era determinado o teor de água e a massa de cada amostra. O equipamento utilizado para determinação da umidade e da massa foi o G 800. Caso não atingisse o valor desejado, novo volume pré-definido de água destilada era adicionado ficando a amostra em espera por mais 24h.

Este último passo foi repetido até que se chegasse ao valor desejado de teor de água.

A amostra de teor-alvo 10 % foi obtida através de secagem em estufa. O procedimento consistiu na secagem da amostra em estufa a 40 °C por 72h. A cada 24h foi tomada uma medida de teor de água para controle.

As medições referem-se à média de duas repetições, cujas quantidades de água, número de dias e os dados obtidos são apresentados na Tab. 4.6.

Verifica-se pelos resultados do primeiro ensaio (do dia 09/01/2007) que a amostra referente ao teor-alvo 35 % não absorveu água regularmente como as outras, mostrando teor de água de apenas 15 %. A explicação para tal comportamento foi a exposição desta amostra ao ambiente. Conforme mostrado na Fig. 4.5, as bandejas plásticas contendo as amostras eram empilhadas e colocadas na câmara fria, ficando a última bandeja (teor-alvo 35 %) aberta. Estando aberta e em câmara fria, parte da água adicionada a esta amostra evaporou, prejudicando o umedecimento das sementes. No entanto, o experimento, como um todo, não foi prejudicado pois foi adicionada água suficiente nos passos posteriores para compensar a perda ocorrida e alcançar o teor de água desejado.

Terminada esta etapa, não foi conseguido o teor-alvo de 35 %. A bandeja apresentou precipitação de água na tampa, no fundo do recipiente e no papel de germinação indicando que a máxima porcentagem de água que o milho é capaz de absorver fica em torno de 30 %. Portanto o domínio de teor de água adotado para calibração do S.M.U. com milho foi fixado de 10 a 30 %.

#### **4.4 Procedimento experimental para calibração e resultados alcançados**

Os resultados obtidos em 4.1 mostraram a existência de influência da temperatura no S.M.U. Desta forma, uma curva de calibração foi elaborada para temperatura ambiente constante (24 °C). Visando à determinação dos limites de variação das tensões de saída do S.M.U. em função da temperatura, um conjunto de ensaios foi feito em uma faixa de temperatura de 10 a 45 °C, procurando desenvolver um procedimento para correção da curva de calibração do S.M.U. em função da temperatura.

Tabela 4.6 – Volume de água (va), teor de água (G800) e massa das amostras (massa), determinados diariamente, visando atingir os teores alvo de água das sementes de milho destinadas à calibração do S.M.U.

	TEOR ALVO ->	10%	15%	20%	25%	30%	35%
08/01/07	va	—	60 ml	60 ml	80 ml	100 ml	100 ml
09/01/07 (após 24 horas)	G 800	—	15,8%	17,1%	18,7%	18,5%	15,0%
	Massa	—	171,3 g	167,9 g	163,5 g	161,3 g	169,8 g
09/01/07	va	—	0 ml	60 ml	80 ml	100 ml	100 ml
10/01/07 (após 24 horas)	G 800	—	15,9%	20,0%	22,8%	22,9%	21,3%
	Massa	—	171,2 g	153,9 g	152,2 g	151,2 g	151,7 g
10/01/07	va	—	0 ml	0 ml	60 ml	100 ml	120 ml
11/01/07 (após 24 horas)	G 800	—	16,4%	19,9%	25,4%	32,5%	29,7%
	Massa	—	169,8 g	158,7 g	153,9 g	155,4 g	151,2 g
11/01/07	va	—	0 ml	0 ml	0 ml	0 ml	40 ml
12/01/07 (após 24 horas)	G 800	—	16,8%	19,6%	26,2%	27,1%	37,3%
	Massa	—	171,1 g	156,0 g	152,1 g	150,4 g	150,9 g
12/01/07	va	secagem em estufa	0 ml	0 ml	0 ml	20 ml	0 ml
15/01/07 (após 24 horas)	G 800	8,6%	16,7%	20,3%	25,7%	29,2%	28,7%
	Massa	175,1 g	171,7 g	157,9 g	148,9 g	151,8 g	150,8 g

#### 4.4.1 Calibração à temperatura 24 °C

De posse das seis amostras preparadas para calibração do S.M.U. (referente às condições conseguidas conforme as duas últimas linhas da Tab. 4.6), definiu-se o procedimento experimental de calibração.

No medidor de umidade *G800* foram medidos o teor de água e a massa de cada amostra (para um volume constante de 220 *ml* referente ao recipiente próprio que acompanha o medidor de umidade *G800*). A variável *U* refere-se à tensão de saída do S.M.U., medido por voltímetro digital MS-60 da Minipa. O teor de água padrão *M* (método de estufa a 105 °C) é obtida através da equação 2.11. Para tanto, foi seguido o procedimento experimental descrito pelas Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 1992) para determinação de teor de água através do método de estufa a 105 °C, onde:  $m_w$  é dado pela diferença da massa inicial (*PI*) e a massa final (*PF*) e  $m_w + m_d$  é dado pela diferença entre *PI* e *t* - massa do recipiente (com a tampa) que contém as amostras (BRASIL, 1992). A tensão em vazio do sensor ( $U_{vazio}$ ) também foi medida ao final de cada teste, com o mesmo voltímetro. A temperatura ambiente foi mantida constante, através de sala climatizada, dentro de uma faixa de 23,0 a 25,9 °C. A Tabela 8.1 do APÊNDICE I mostra os dados obtidos da calibração com duas repetições.

Na Tabela 4.7 estão as médias dos valores da Tab. 8.1. O método escolhido para construção de modelos empíricos é a regressão por mínimos quadrados<sup>1</sup> (NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2003). O primeiro modelo construído (a partir dos dados das Tab. 8.1 APÊNDICE I) tem a forma linear em função da disposição gráfica dos resultados (Fig. 4.6a). Pela análise da Fig. 4.6a, um modelo linear parece ajustar-se aos dados. Entretanto, o gráfico dos resíduos (Fig. 4.6b) não oferece uma conclusão segura acerca do modelo, visto o pequeno número de testes realizados. A fim de aumentar a qualidade do modelo, seis novos ensaios foram realizados, tendo como resultados as Tab. 8.2 do APÊNDICE I e 4.8.

Da Figura 4.7, o modelo cúbico parece adequar-se ao conjunto de dados analisados. O gráfico dos resíduos apresenta diminuição de amplitude de variação, não passando de 0,5 *V*. No entanto, mais seis ensaios com teores-alvo diferentes foram realizados na tentativa de cobrir melhor os espaços vazios de dados (principalmente entre 15 e 25 %). As Tabelas 8.3 APÊNDICE

<sup>1</sup>via MATLAB® - conferir programa base no PROGRAMA III do Apêndice III



Tabela 4.7 – Tensão de saída U medida no ensaio de calibração do sensor de umidade a diferentes teores de água para milho - primeira etapa

Teor-Alvo (%)	média M (%)	média G 800 (%)	média U (V)
10	5,82	8,9	4,99
15	14,65	16,7	4,23
20	19,00	20,3	2,62
25	27,68	26,0	0,70
30	29,58	29,2	0,51
35	29,94	30,7	0,48

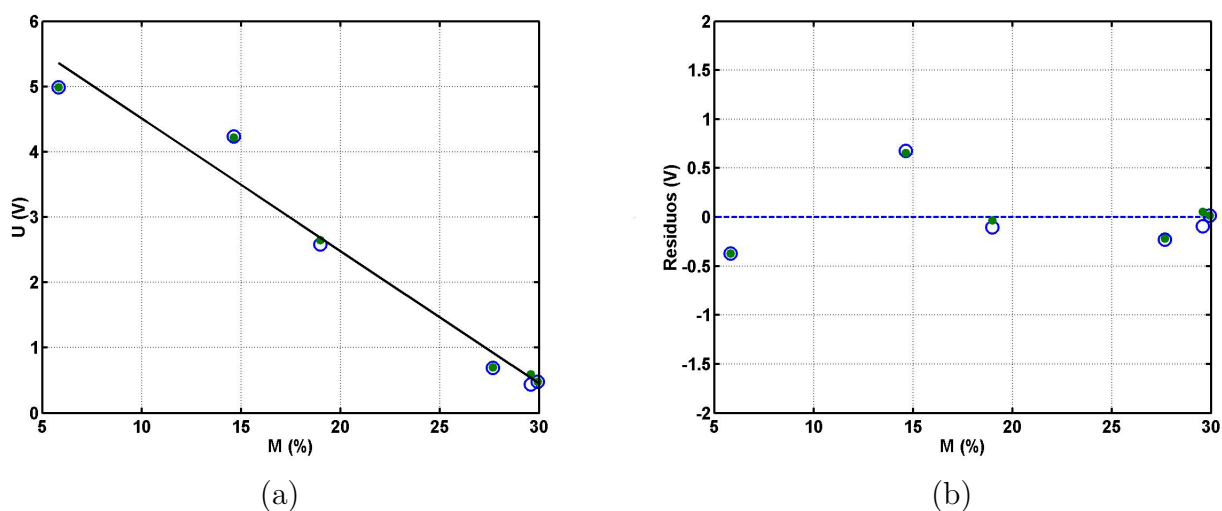


Figura 4.6 – Modelo estimado para calibração do S.M.U. com milho: (a) modelo linear (b) distribuição dos resíduos

Tabela 4.8 – Tensão de saída U medida no ensaio de calibração do sensor de umidade a diferentes teores de água para milho - segunda etapa

Teor-alvo (%)	média M (%)	média G 800 (%)	média U (V)
10	7,60	9,9	4,88
12	9,66	12,1	4,75
14	12,29	14,9	4,55
18	18,54	19,0	2,73
22	23,44	22,5	1,12
24	27,55	26,0	0,65

I e 4.9 mostram os resultados.

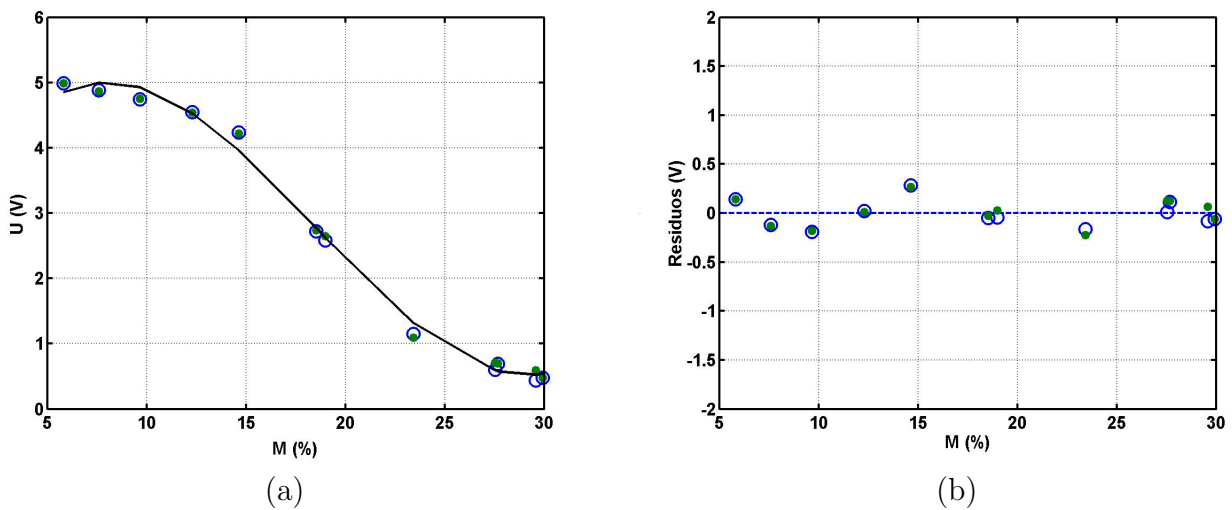


Figura 4.7 – Modelo estimado para calibração do S.M.U. com milho: (a) modelo cúbico (b) distribuição dos resíduos

Tabela 4.9 – Tensão de saída  $U$  medida no ensaio de calibração do sensor de umidade a diferentes teores de água para milho - terceira etapa

Teor-alvo (%)	média $M$ (%)	média $G$ 800 (%)	média $U$ (V)
14	12,31	14,5	4,47
17	15,57	17,7	3,92
18	16,60	18,4	3,53
21	20,31	20,6	1,97
22	21,97	21,1	1,48
24	24,53	23,6	0,940

O último conjunto de dados adicionados ao modelo veio confirmar, em primeira análise, que um modelo estimado adequado à calibração do S.M.U. para milho, na faixa de 5 a 30 % de teor de água, seria mesmo o cúbico (Fig. 4.8).

#### 4.4.2 Determinação da variação de $U$ para a faixa de temperatura de 10 a 45 °C

Sabendo da influência da temperatura no S.M.U., foram realizados novos ensaios cujo objetivo foi a quantificação do nível de variação de  $U$  em função da temperatura para vários teores.

Utilizando o mesmo procedimento experimental definido em 4.3 para umidificação de

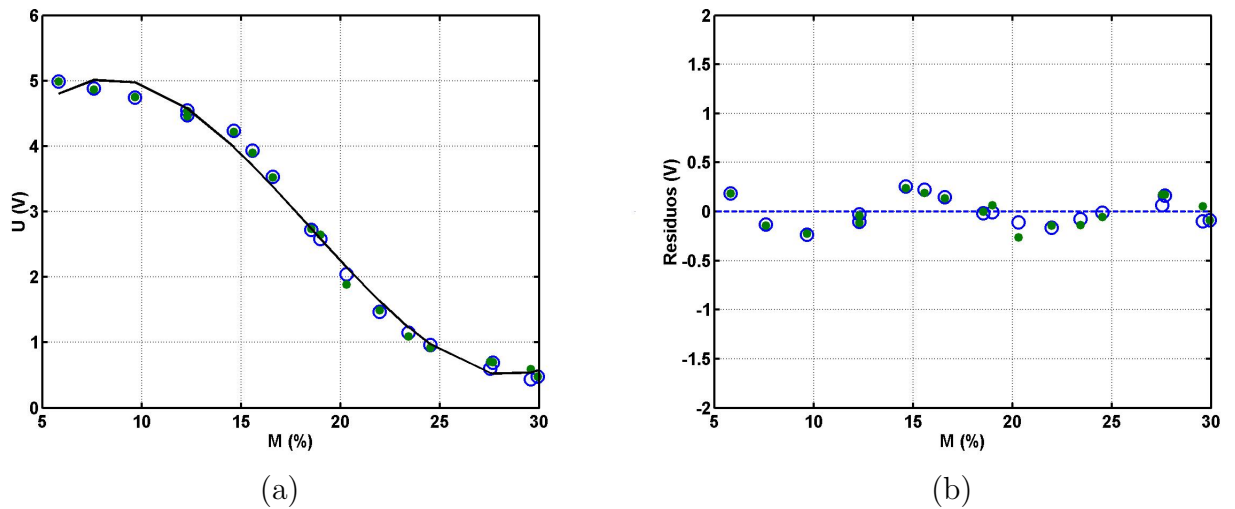


Figura 4.8 – Modelo estimado para calibração do S.M.U. com milho: (a) modelo cúbico (b) distribuição dos resíduos

sementes e o procedimento adotado em 4.4.1 para calibração do S.M.U., obteve-se valores de tensão de saída  $U$  em função da temperatura. Cinco amostras de milho com teores-alvo de 11, 14, 17, 23 e 29% foram utilizadas para realizar ensaios com cinco níveis de temperatura. As temperaturas selecionadas foram 10, 17, 24, 35 e 45 °C. Tais níveis foram conseguidos com o uso da câmara de acondicionamento B.O.D. O sensor com as sementes foram mantidos dentro da B.O.D., sendo que o controlador, voltímetro e demais sistemas foram utilizados em temperatura ambiente. A bancada experimental é a mesma mostrada na Fig. 4.1.

Para cada nível de temperatura foi realizado um ensaio, com repetição, dos cinco níveis de teor de água pré-estabelecidos. As amostras de milho foram mantidas na estufa B.O.D. (juntamente com o sensor) por um período de 30 a 40min para cada ensaio, de forma que o equilíbrio térmico fosse atingido. Atingida a temperatura esperada, foram feitas as leituras de  $U$  e retirada a amostra para teste de teor de água em estufa a 105 °C.

Desta forma, foi obtido um conjunto de dados que cobrem a faixa de 5 a 30 % para o milho com variação de temperatura de 10 a 45 °C. Estes dados são apresentados nas Tab. 8.4, 8.5, 8.6 e 8.7 do Apêndice I e condensados em seus valores médios na Tab. 4.10 (juntamente com os dados médios das Tab. 4.7, 4.8 e 4.9 do Apêndice I).

Tabela 4.10 – Valores médios de teor de água  $\bar{M}$  em porcentagem (obtidos pelo método de estufa a 105 °C) e da tensão  $\bar{U}$  em volts, a diferentes temperaturas, para calibração do S.M.U. de sementes de milho, operando de 5 a 30 % de teor de água, variação de temperatura de 10 a 45 °C e temperatura de referência 24 °C

$\bar{M}$ (%)	$\bar{U}_{10^{\circ}C}$ (V)	$\bar{U}_{17^{\circ}C}$ (V)	$\bar{U}_{24^{\circ}C}$ (V)	$\bar{U}_{35^{\circ}C}$ (V)	$\bar{U}_{45^{\circ}C}$ (V)
5,82			4,99		
7,60			4,88		
8,75	5,36				
8,97		5,13			
9,11					4,25
9,11				4,53	
9,66			4,75		
11,87	5,04				
11,92					3,90
11,93				4,22	
11,99		4,83			
12,29			4,55		
12,31			4,47		
14,56	4,74				
14,64		4,43			
14,65			4,23		
15,12					2,91
15,27				3,31	
15,57			3,92		
18,54			2,73		
16,60			3,53		
19,00			2,62		
20,31			1,97		
22,40					0,95
23,44			1,12		
21,97			1,48		
22,10		1,78			
22,38	2,02				
22,76				1,00	
24,53			0,94		
27,55			0,65		
27,68			0,70		
27,91					0,65
28,04		0,75			
28,06	0,47				
28,13				0,58	
29,58			0,51		
29,94			0,48		

#### 4.5 Discussão sobre os resultados obtidos do procedimento de calibração do sensor de umidade

Na Tabela 4.10 e Figura 4.9 estão os dados obtidos durante o processo de calibração do S.M.U.

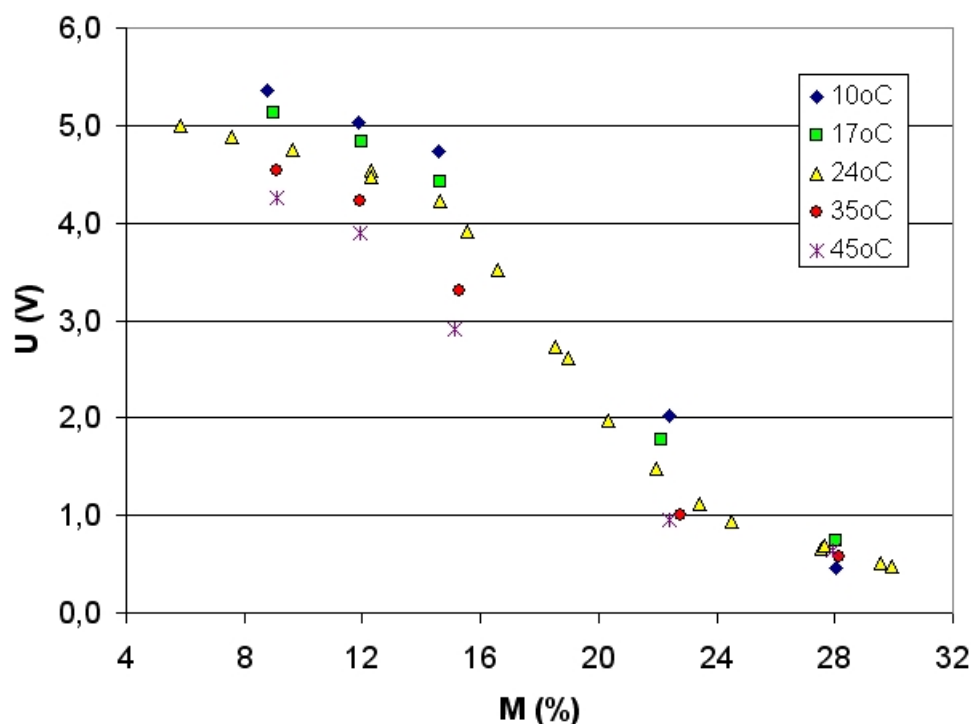


Figura 4.9 – Calibração do S.M.U. para milho referente aos dados da Tab. 4.10

Da Figura 4.9, nota-se sensibilidade do S.M.U. para valores de teor de água na faixa intermediária de 15 % a 25 %. Nas faixas abaixo de 15 % e acima de 25 %, o S.M.U. também apresenta sensibilidade, porém em menor grau. Além disso, existe a influência da temperatura, podendo chegar a uma variação de quase  $\pm 1$  Volt para um teor de água em torno de 15 %.

Optou-se por fazer a discussão em duas etapas. A primeira trata da análise dos resultados para temperatura de 24 °C e a segunda faz uma análise sobre o efeito da temperatura na calibração obtida para 24 °C.

#### 4.5.1 Calibração à temperatura 24 °C

Berbert e Stenning (1997) encontraram uma relação linear de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  para teores de água abaixo de 14 % para o trigo (item 2.4.1). Tais resultados são válidos para freqüências de 0,5 a 5,0 MHz e temperaturas de 21 a 24 °C. Comparando os resultados citados para o trigo com os obtidos neste estudo para o milho, tem-se a concordância do comportamento linear para valores de teor de água abaixo de 15 %. Isto mostra que, para o milho, mesmo para freqüências da ordem de 10 kHz, o comportamento mantém-se linear. Também indica que, para baixos valores de teor de água, independentemente da freqüência de aplicação do campo elétrico,  $\epsilon$  comporta-se linearmente com o teor de água.

A afirmação anterior somente será válida caso se possa, de fato, comparar os resultados de Berbert e Stenning (1997) com os obtidos neste trabalho. Os autores apresentam a variação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  com o teor de água. Neste trabalho, no entanto, tem-se a variação da tensão de saída  $U$  do S.M.U. com o teor de água. Portanto faz-se necessário considerar que:

- A capacitância  $C$  (sensor capacitivo mais dielétrico milho) é dependente, exclusivamente, da variação de  $\epsilon$ . Isso é verdade lembrando que a capacitância  $C$  relaciona-se com  $\epsilon$  através da equação 2.5. Nesta equação, todos os parâmetros (com exceção do próprio  $\epsilon$ ) são constantes pois a geometria do sensor capacitivo é constante (ver item 3.3).
- A Tensão de Saída  $U$  do S.M.U. é dependente, exclusivamente, da variação de  $C$ . Essa afirmação encontra fundamento no fato de que a tensão de saída do sensor capacitivo (que é alternada) é retificada por um Amplificador Operacional que tem características lineares de entrada e saída (BERLIN, 1983).

Para valores de teor de água acima de 15 %, o perfil da curva deixa de ser linear. Este comportamento ocorreu devido à baixa freqüência de campo elétrico utilizada. Da literatura consultada (ver item 2.4.1), existe uma tendência de linearização de  $\epsilon$  (para toda a faixa de teor de água de uma dada semente) apenas para freqüências de ordem de MHz e acima (ver item 2.4.1). Sendo assim, para a efetiva calibração do sistema, o uso de um modelo não-linear tem que ser analisado.

Na seção anterior foi aventado, em uma análise preliminar, que um modelo cúbico

seria capaz de atender à calibração do S.M.U. Pela análise da Fig. 4.8 (a) tal modelo adequa-se bem ao perfil dos dados. Por outro lado, a análise dos resíduos na Fig. 4.8 (b) deixa a desejar no quesito aleatoriedade. Não obstante, um modelo cúbico seria de difícil implementação ao S.M.U. proposto, visto que o C.L.P. utilizado não dispõe das capacidades necessárias para implementação de tal modelo. Um modelo não-linear só seria implementável com a ajuda de recursos computacionais avançados, o que contraria os requisitos de construção **RC-01**, **RC-03**, **RC-04**, **RC-05** e **RC-07** (Item 3.1).

Uma solução possível é separar o conjunto total de dados em dois subconjuntos: o primeiro referente a teores de água de 5 a 15 % e o segundo de 15 a 30 %. Esta separação é sugerida pela análise da Fig. 4.9. Observa-se que, dentro dos subconjuntos de dados propostos, existe a possibilidade de construção de um modelo linear para teores de 5 a 15 % e um modelo inverso de 15 a 30 %. Tal modelo inverso é uma transformação linearizante conseguida com a troca da variável teor de água  $M$  pela sua inversa  $1/M$  (NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2003). Neste caso, tais modelos são perfeitamente implementáveis em um C.L.P. pela simples inversão das funções dos modelos estimados.

Adicionalmente, define-se que o modelo estimado para teores de 5 a 15 % refere-se a milho seco e o modelo estimado para teores de 15 a 30 % refere-se a milho úmido. Esta designação está em consonância com alguns medidores de umidade capacitivos comerciais que trazem faixas de análise para milho seco e úmido.

O modelo linear para milho seco (Fig. 4.10) mostrou uma distribuição de resíduos bastante satisfatória enquanto o modelo inverso do teor de água (Fig. 4.11) exhibe uma distribuição de resíduos tendenciosa.

Com o intuito de se conseguir modelos melhores, outro agrupamento de dados foi feito recorrendo-se mais uma vez à Fig. 4.9. Reagrupando novamente os dados, existe um comportamento linear da relação  $M \times U$  para três faixas distintas de teor de água: até 15 %, entre 15 e 23 % e acima de 23 %. Deste modo, o subconjunto de 15 a 30 % foi dividido em dois: um conjunto de 15 a 23 % e outro de 23 a 30 %. Redefine-se o primeiro como sendo milho úmido e o segundo como milho extra-úmido.

Os resíduos dos dois novos modelos (Fig. 4.12 e 4.13) mostram-se em uma distribuição aleatória. Desta forma, é feita uma avaliação da qualidade dos ajustes dos modelos pelo método

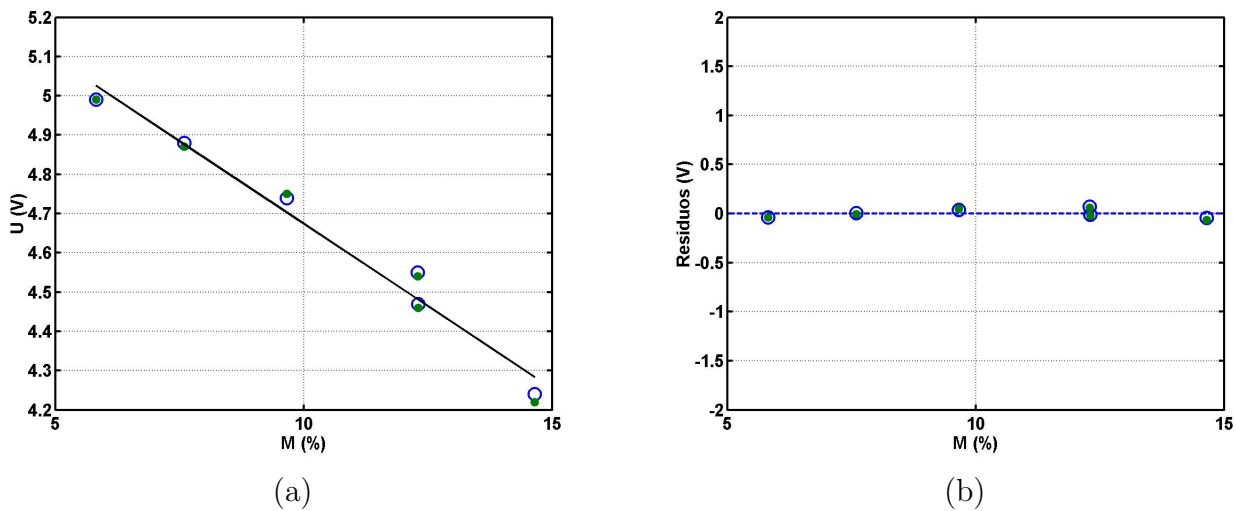


Figura 4.10 – Modelo linear estimado para milho seco à 24 °C: (a) curva de ajuste (b) distribuição dos resíduos

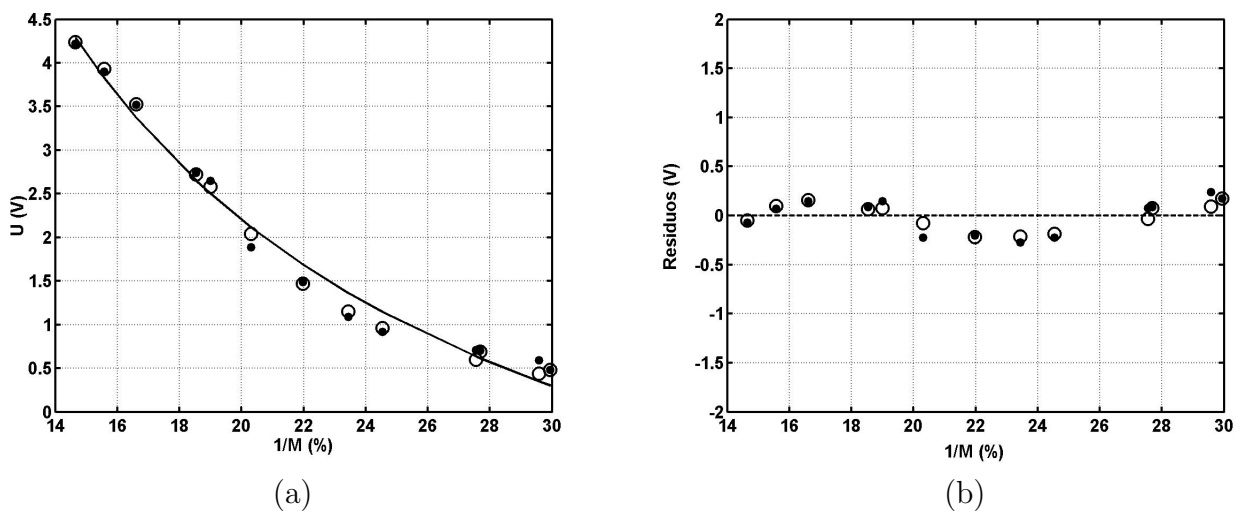


Figura 4.11 – Modelo inverso do teor de água estimado para milho úmido à 24 °C: (a) curva de ajuste (b) distribuição dos resíduos



da Análise de Variância (NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2003). A análise é aplicada aos modelos ajustados para milho seco (eq. 4.1), úmido (eq. 4.2) e extra-úmido (eq. 4.3), referentes, respectivamente, às Fig. 4.10, 4.12 e 4.13. Os índices acima dos coeficientes das equações são os desvio-padrão e os índices ao lado direito são os intervalos de confiança a 95 % (NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2003).

Os intervalos de confiança validam todos os coeficientes dos três modelos como estatisticamente significativos. Adicionalmente, a análise de variância (ANOVA) (Tab. 4.11, 4.12 e 4.13) mostra uma alto coeficiente de determinação  $R^2$  (também chamado de % de variação explicada) para os três modelos. Isto comprova que grande parte da variação em torno da média é descrita pela equação de regressão.

$$\hat{U}_{seco} = 5,515_{(\pm 0,0747) (5,307 \ 5,722)} - 0,0840_{(\pm 0,0069) (-0,103 \ -0,0650)} M \quad (4.1)$$

$$\hat{U}_{umido} = 9,593_{(\pm 0,238) (9,011 \ 10,175)} - 0,368_{(\pm 0,0125) (-0,398 \ -0,337)} M \quad (4.2)$$

$$\hat{U}_{extra-umido} = 3,282_{(\pm 0,282) (2,499 \ 4,065)} - 0,0939_{(\pm 0,0104) (-0,123 \ -0,0652)} M \quad (4.3)$$

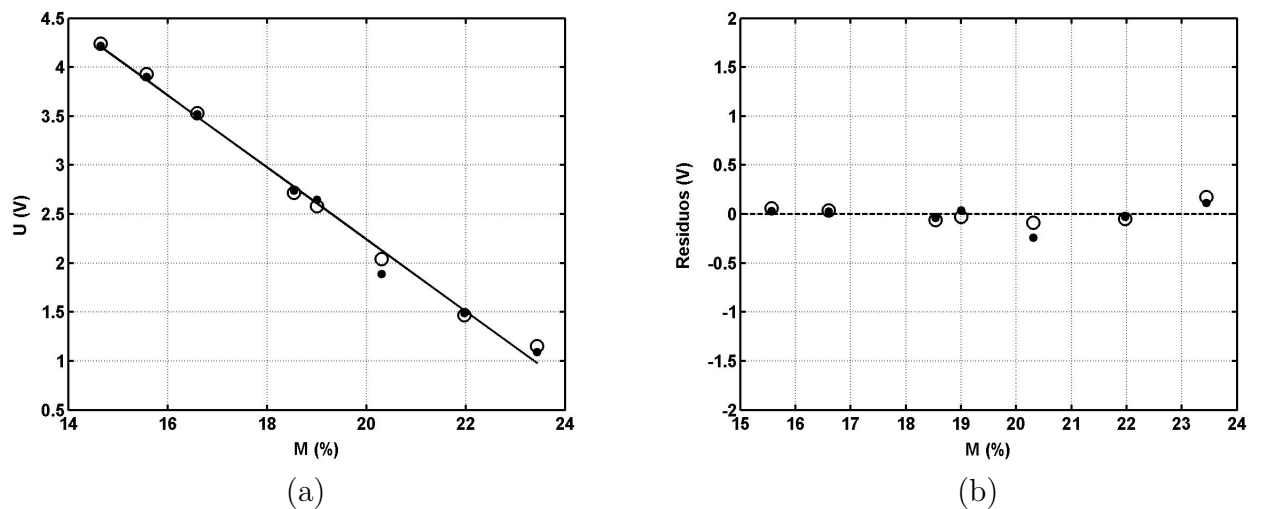


Figura 4.12 – Modelo linear estimado para milho úmido à 24 °C: (a) curva de ajuste (b) distribuição dos resíduos

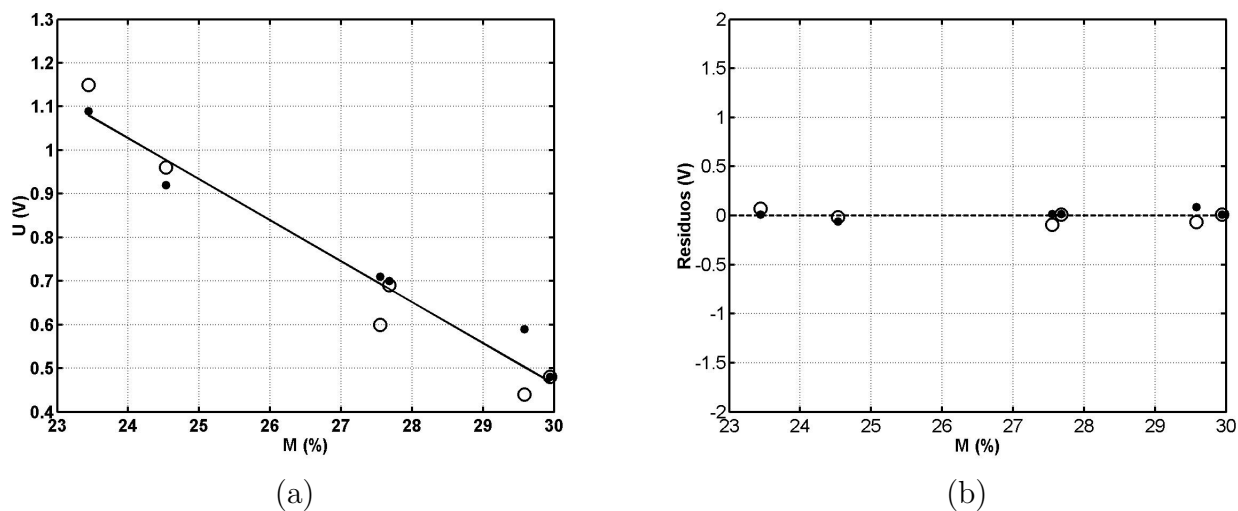


Figura 4.13 – Modelo linear estimado para milho extra-úmido à 24 °C: (a) curva de ajuste (b) distribuição dos resíduos

Tabela 4.11 – Tabela de análise de variância do modelo linear obtido para milho seco a 24 °C

Fonte de variação	Soma quadrática	No de g. l.	Média quadrática
Regressão	0,773	1	0,773
Resíduos	0,0209	10	0,0021
Falta de ajuste	0,0205	4	0,0051
Erro puro	0,00040	6	0,000067
Total	0,793	11	
% de variação explicada ( $R^2$ ):		97,37	
% máxima de variação explicável:		99,95	

Tabela 4.12 – Tabela de análise de variância do modelo linear obtido para milho úmido a 24 °C

Fonte de variação	Soma quadrática	No de g. l.	Média quadrática
Regressão	17,953	1	17,953
Resíduos	0,125	14	0,0089
Falta de ajuste	0,109	6	0,0181
Erro puro	0,0166	8	0,0021
Total	18,078	15	
% de variação explicada ( $R^2$ ):		99,31	
% máxima de variação explicável:		99,91	

Tabela 4.13 – Tabela de análise de variância do modelo linear obtido para milho extra-úmido a 24 °C

Fonte de variação	Soma quadrática	No de g. l.	Média quadrática
Regressão	0,613	1	0,613
Resíduos	0,0299	10	0,0030
Falta de ajuste	0,0099	4	0,0025
Erro puro	0,0199	6	0,0033
Total	0,643	11	
% de variação explicada ( $R^2$ ):		95,36	
% máxima de variação explicável:		96,90	

#### 4.5.2 Efeito da temperatura na calibração a 24 °C

Os modelos ajustados no item anterior referem-se à calibração do S.M.U. a uma temperatura média de 24 °C. No entanto, no item 4.1 demonstrou-se a importância do efeito da temperatura na tensão de saída  $U$  e  $U_{vazio}$  do S.M.U. Este efeito é visualizado no gráfico da Fig. 4.9. Pelo gráfico, observa-se uma relação inversa entre temperatura e  $U$  para teores até aproximadamente 23 %. Com o aumento da temperatura, a  $U$  cai. A altos níveis de teor de água (acima de 23 %), este comportamento não é mais observado.

Apesar da obtenção dos modelos para cada temperatura, via regressão por mínimos quadrados, ser possível (ver Apêndice II), uma análise estatística não é eficaz pelo reduzido número de dados. Isso torna tais modelos não confiáveis para uso em uma correção da calibração em função da temperatura.

Por outro lado, a análise das variações da tensão em vazio  $U_{vazio}$  indica uma forte influência da temperatura no sensor. A Tabela 4.14 mostra os valores médios das  $U_{vazio}$  provenientes das Tab. 8.4, 8.5, 8.6 e 8.7 do Apêndice I. Como nesta situação o sensor encontra-se sem sementes, toda a influência observada pelo efeito da temperatura é necessariamente incidente sobre o sensor. Da Tabela, tem-se uma variação de cerca de 1 V quando a temperatura é elevada de 12 para 45 °C. É a mesma ordem de grandeza observada na Fig. 4.9 quando, para um mesmo teor de água, eleva-se a temperatura de 10 para 45 °C. Visto que a ordem de grandeza das variações de  $U$  com semente e sem semente é a mesma, pode-se inferir que a maior influência da temperatura seja mesmo sobre o sensor e não sobre as sementes. Sugere-se que o circuito eletrônico do sensor de umidade é mais sensível à variação de temperatura externa que a influência da variação de temperatura nas propriedades dielétricas das sementes.

Tabela 4.14 – Variação da  $U_{vazio}$  em função da Temperatura

Temperatura média (°C)	$U_{vazio}$ média (V)
11,8	5,53
17,2	5,34
24,5	5,10
34,7	4,83
44,9	4,57

#### 4.5.3 Efeito da densidade (variação do $P_{ap}$ ) na calibração a 24 °C

No Capítulo 2, sub-item 2.4.4 foi descrita a influência do peso específico nas propriedades dielétricas das sementes. Esta influência não é observada nos métodos padrões de determinação de teor de água  $M$  pois baseiam-se na definição dada pela equação 2.11 e exigem apenas a determinação das componentes  $m_w$  e  $m_d$ . Esses componentes podem ser obtidos pelos métodos diretos de determinação de teor de água que envolvem a evaporação de água (método estufa) ou destilação.

No entanto, métodos indiretos de determinação de teor de água (como o capacitivo) são influenciados não apenas pela massa de água contida nos grãos ( $m_w$ ) mas também pela densidade volumétrica ( $\rho$ ). Como o sensor possui uma mistura ar-grão, variações de  $\rho$  influenciarão nos sinais elétricos, introduzindo uma fonte de erro. Este erro é particularmente alto em medições executadas onde existe um fluxo de grãos (KRASZEWSKI E NELSON, 1994).

Não é este o caso deste trabalho visto que as medições têm caráter estático. Ainda assim, para que erros sejam minimizados, é necessário que o volume  $v$  seja constante e a massa de material seco  $m_d$  também o seja. Manter  $v$  constante durante uma medição estática (isto é, sem fluxo dinâmico de grãos) é perfeitamente viável. Porém  $m_d$  não é constante visto que depende da forma, dimensões, temperatura, teor de água, estrutura e condições da superfície do grão.

Já foi observado que a influência da densidade no S.M.U. proposto é bastante pequena em relação à influência da temperatura (ver item 4.1). Contudo a própria variação de teor de água tem efeito sobre a densidade que, por sua vez, induzirá erros na leitura de teor de água.

Esta variação de densidade com o teor de água é observada através dos resultados obtidos e mostrados nas Tab. 8.1, 8.2 e 8.3 do Apêndice I. Condensando tais resultados em suas médias obtém-se a Tab 4.15. A Figura 4.15 ilustra os dados na forma de um gráfico.

Com o aumento do teor de água das sementes, existe uma diminuição dos valores de Peso específico aparente ( $P_{ap}$ ). Este comportamento pode ser explicado pelo aumento de volume das sementes devido a sorção de água pelas mesmas. Como o volume usado na medição das massas foi sempre constante (recipiente de 220 ml), com a adição de água (aumento do teor de água) menos massa de semente é capaz de preencher o recipiente utilizado, ocasionando a

Tabela 4.15 – Média dos Pap obtidos via ensaios e valores de Pap obtidos via modelo construído por Benedetti e Jorge (1987)

teor alvo de água (%)	M (%)	$\zeta$ (decimal)	Peso (g)	Pap Medido (g/ml)	Pap Modelo (g/ml)
10	5,82	0,058	172,3	0,783	0,772
10	7,60	0,076	169,6	0,771	0,760
12	9,66	0,097	172,2	0,783	0,746
14	12,29	0,123	172,0	0,782	0,727
14	12,31	0,123	170,2	0,774	0,727
15	14,65	0,147	164,8	0,749	0,711
17	15,57	0,156	166,5	0,757	0,705
18	16,60	0,166	161,9	0,736	0,697
18	18,54	0,185	151,3	0,688	0,684
20	19,00	0,190	156,6	0,712	0,681
21	20,31	0,203	149,9	0,681	0,672
22	21,97	0,220	148,7	0,676	0,660
22	23,44	0,234	144,7	0,658	0,650
24	24,53	0,245	143,9	0,654	0,642
24	27,55	0,275	140,3	0,638	0,621
25	27,68	0,277	141,1	0,641	0,620
30	29,58	0,296	141,4	0,643	0,607
35	29,94	0,299	138,7	0,630	0,605

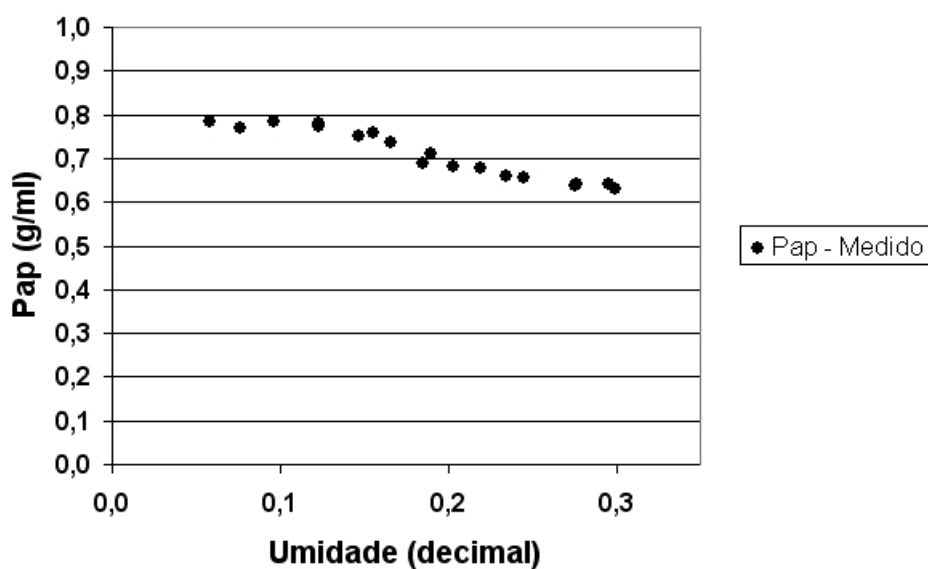


Figura 4.14 – Variação do Pap com o teor de água

diminuição do  $P_{ap}$ .

Tal comportamento também foi descrito por Benedetti e Jorge (1987). Estes autores propuseram um modelo que estima a variação do  $P_{ap}$  do milho com o teor de água, a saber:

$$P_{ap} = 0,813 - 0,696\zeta \quad (4.4)$$

Aplicando os dados de teor de água da Tab. 4.15 ao modelo acima, pode-se compará-lo com os valores de  $P_{ap}$  obtidos experimentalmente. A Figura 4.15 mostra a comparação. As escalas do gráfico foram alteradas para que fiquem condizentes com o gráfico de origem do modelo (Fig.2.17).

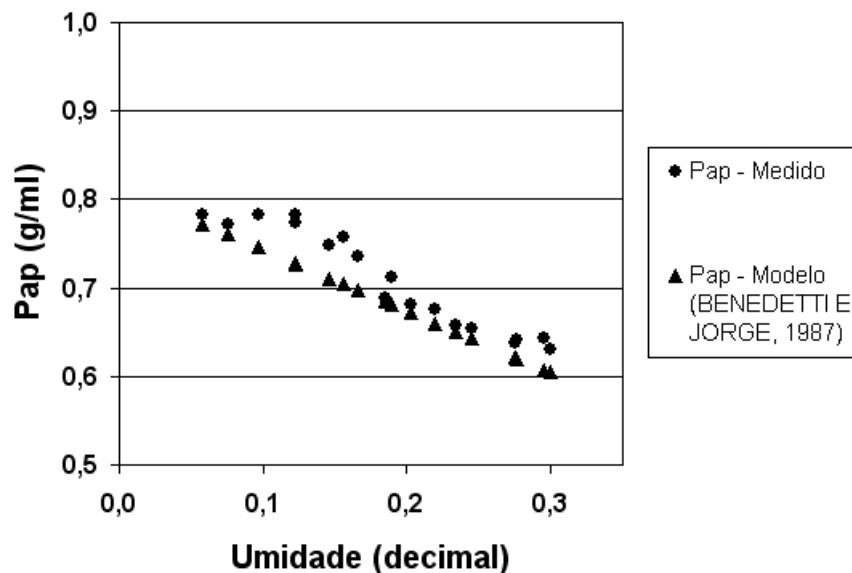


Figura 4.15 – Comparação entre os Pap obtidos via ensaios e valores de Pap obtidos via modelo construído por Benedetti e Jorge (1987)

Apesar da mesma tendência, existe um erro sistemático entre as duas curvas. Estes erros podem ter origem na forma, dimensões, temperatura, estrutura e condições da superfície da semente utilizada; todos estes fatores já citados por Kraszewski e Nelson (1994).

Esta variação de  $P_{ap}$  em função do teor de água leva, como explicado acima, a uma diminuição de massa presente dentro da cuba sensora do S.M.U. Isto será refletido em uma alteração das propriedades dielétricas que dependem, não apenas da presença da água (como desejado), mas também da diminuição de massa que interage com o campo elétrico, passando a ser uma fonte de erro.

Contudo, foi mostrado no item 4.1 que a densidade apresentou influência na  $U$  do S.M.U. de, no máximo,  $0,11 V$ . Isto, considerando que houve peneiramento dos grãos. Nas condição de colheita de parcelas, não existe seleção de forma ou dimensão da semente o que colabora para que a influência da densidade seja ainda menor. Como a variação máxima conseguida com o planejamento do item 4.1 foi de  $0,11 V$  e este valor é inferior ao desvio-padrão assinalado nos modelos das eq. 4.1, 4.2 e 4.3 o efeito da densidade na leitura do S.M.U. será desprezado.

#### **4.6 Implementação do programa de controle do S.M.U.**

Determinadas as curvas de calibração, passou-se à fase de implementação do programa de controle. Como já estabelecido, o programa será feito para implementação *LADDER*. Consiste de dois módulos principais: Correção automática da temperatura e seleção da curva de calibração. Estes módulos são detalhados nas seções subseqüentes. O programa completo pode ser visto no Anexo I.

##### *4.6.1 Correção automática de $U$ em função da temperatura*

Como visto nos itens anteriores, a temperatura tem forte influência no S.M.U. Desta forma, ela passa a ser um parâmetro de medição. Com o intuito de construir um sistema automático de correção de leitura em função da temperatura, foi proposta a introdução de um sensor termoresistor tipo PT-100 para leitura de temperatura. Seu princípio de funcionamento baseia-se na variação de resistência ôhmica em função da temperatura e sua escolha deveu-se ao fato de que o C.L.P. utilizado neste trabalho já é pré-disposto para instalação deste tipo de sensor.

Orlando (2003) descreve as duas principais classes de termoresistores como A e B. A tolerância inicial de um PT-100 é definida como o máximo desvio permitido da relação nominal, expressa em  $^{\circ}C$ . A Tabela 4.16 apresenta os valores de tolerância para cada classe.

Para a temperatura de  $45^{\circ}C$ , a tolerância do termoresistor classe A é de  $0,24^{\circ}C$ . Por ser uma tolerância pequena, foi escolhido o sensor PT-100 classe A para leitura de temperatura.

Foi necessário, então, determinar um critério para correção do teor de água em função



Tabela 4.16 – Valores de tolerância para cada classe de PT-100 (ORLANDO, 2003)

Classe	Tolerância ( $^{\circ}C$ )
A	$0,15 + 0,002T$
B	$0,30 + 0,005T$

da temperatura. No item 4.5.2 foi mostrado que a temperatura tem influência predominante sobre o sensor, em detrimento da influência que a temperatura tem sobre as sementes. Essa influência é caracterizada pela variação da  $U_{vazio}$  em função da temperatura. Sendo assim, será tomada a variação da  $U_{vazio}$  como fator de correção do S.M.U. para diminuição dos erros gerados pela variação de temperatura.

Para tanto, foi feita a instalação do termoresistor tipo PT-100 na cuba sensora, junto ao suporte isolante. O C.L.P. já possui entrada analógica/digital específica para este componente, bastando fazer a programação adequada. O princípio utilizado no programa foi de correção por diferenças de temperatura. Tomando a temperatura de  $24^{\circ}C$  como referência (temperatura de calibração do sensor), todo desvio desta temperatura será corrigido pelo programa. Os desvios são definidos como a diferença entre a temperatura de referência ( $24^{\circ}C$ ) menos o valor lido pelo termoresistor.

A correção é feita conforme a Tab. 4.14. Cinco faixas de temperatura foram definidas para a correção. Os limites superior e inferior da primeira faixa referem-se, respectivamente, ao valor médio entre  $24,5^{\circ}C$  e  $34,7^{\circ}C$  e  $24,5^{\circ}C$  e  $17,2^{\circ}C$ . Desta forma, a primeira faixa corresponde aos valores de temperatura para os quais a tensão  $U$  não será corrigida pois estão na faixa correta de temperatura de calibração. As demais faixas foram construídas da mesma forma, porém apresentarão fatores de correção para  $U$ .

A correção se dá quando a diferença entre a temperatura de referência  $24,5^{\circ}C$  e a temperatura lida pelo termoresistor supera os limites das faixas estabelecidas. Para tanto, é somada uma constante de correção à tensão de saída  $U$  do S.M.U. sendo o resultado atribuído a uma nova variável chamada  $U$  corrigida. A constante de correção é o valor necessário para que  $U$  volte a ser  $5,1 V$  (na condição de cuba sensora vazia) e obtida a partir dos dados da Tab. 4.14. O fluxograma da Fig. 4.16 mostra a lógica do programa, bem como as faixas de temperatura escolhidas e as constantes de correção.

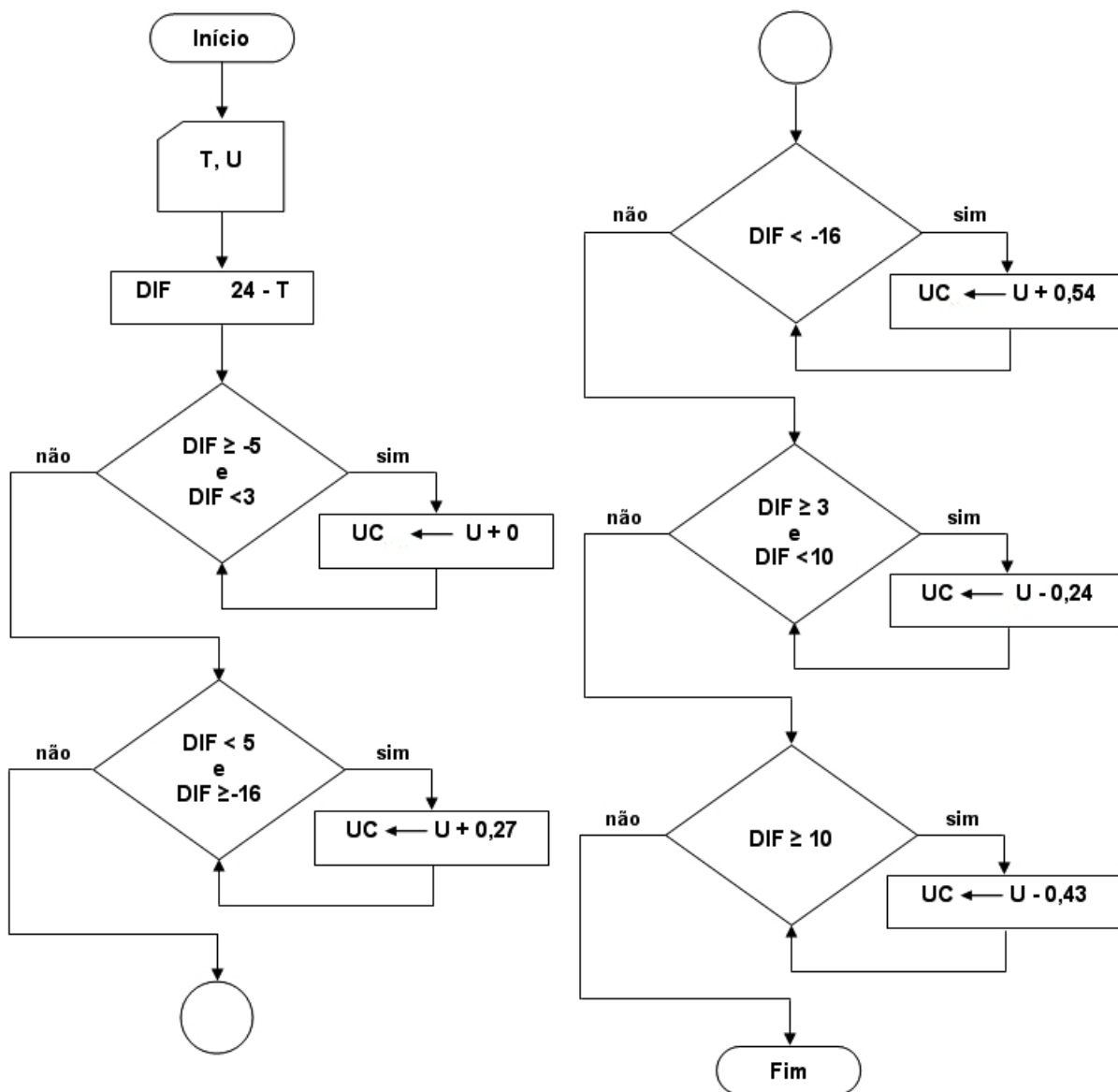


Figura 4.16 – Fluxograma para correção automática de  $U$  em função da temperatura.  $T$  - temperatura lida pelo termoresistor;  $U$  - tensão de saída do sensor de umidade;  $UC$  - tensão de saída corrigida;  $DIF$  - diferença entre a temperatura referência e a temperatura lida

#### 4.6.2 Seleção da curva de calibração

A seleção da curva de calibração faz-se necessária dada as três curvas obtidas das eq. 4.1, 4.2 e 4.3. Cada curva é própria para leitura de uma faixa de teor de água, a saber: até 15 % (milho seco), entre 15 % e 23 % (milho úmido) e acima de 23 % (milho extra-úmido). Invertendo tais equações, tem-se o valor estimado de teor de água dado pelas seguintes equações:

$$\hat{M}_{seco} = 65,65 - 11,90U \quad (\text{para } U \geq 4,2V) \quad (4.5)$$

$$\hat{M}_{umido} = 26,07 - 2,72U \quad (\text{para } 1,1V < U < 4,2V) \quad (4.6)$$

$$\hat{M}_{extra-umido} = 34,95 - 10,65U \quad (\text{para } U \leq 1,1V) \quad (4.7)$$

Para definição do critério de escolha da curva, tomou-se o gráfico da Fig. 4.12, referente à curva de calibração para milho úmido. O C.L.P. faz constantemente a leitura da tensão de saída  $U$  do sensor de umidade. Define-se que para leituras de  $U$  acima de 4,2 V (ver Fig. 4.12) seleciona-se a curva de calibração para milho seco (eq. 4.5). Para leituras de  $U$  abaixo de 1,1 V (ver Fig. 4.12) seleciona-se a curva de calibração para milho extra-úmido (eq. 4.7). Para leituras de  $U$  entre 1,1 V e 4,2 V seleciona-se a curva de calibração para milho úmido (eq. 4.6). O fluxograma da Fig. 4.17 mostra a lógica do programa. Notar que a tensão de saída  $U$  foi substituída pela tensão de saída corrigida pela temperatura  $UC$ .

#### 4.7 Atendimento aos Requisitos de Construção

No início do Capítulo 3 foram definidos os requisitos que o sistema de medição deveria atender a fim de que funcionasse adequadamente no ambiente de trabalho típico de uma colhedora. Estando o protótipo definido e construído, será feita a seguir uma breve discussão sobre as qualidades do sistema relacionadas a cada **RC**.

- **RC-01** - Robustez mecânica → A cuba sensora foi feita em chapa de aço 3,2 mm de espessura com o intuito de resistir às vibrações e eventuais choques mecânicos;

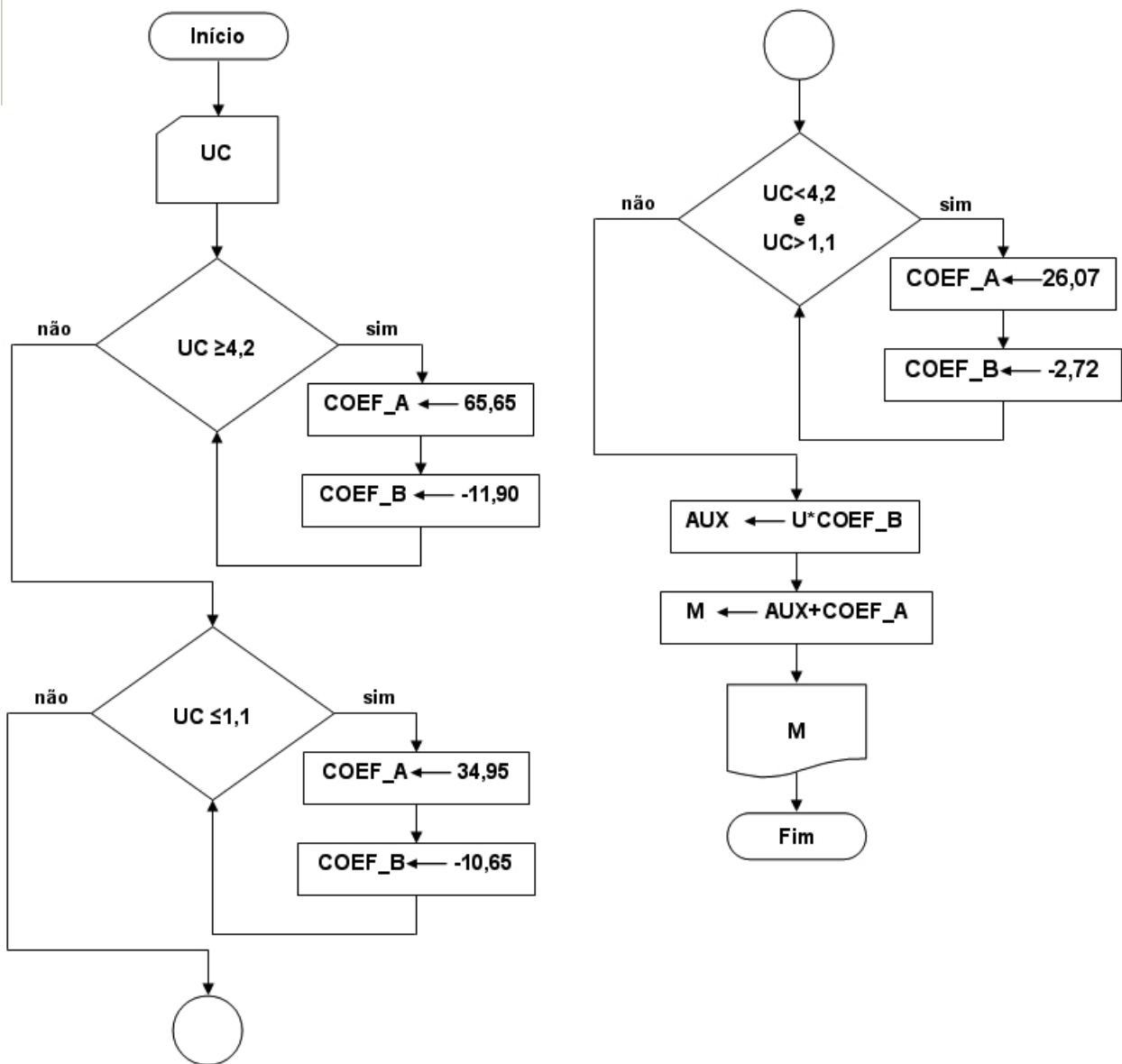


Figura 4.17 – Fluxograma para seleção da curva de calibração. UC - tensão de saída corrigida pela temperatura; COEF A - coeficiente A da curva de calibração; COEF B - coeficiente B da curva de calibração; AUX - variável auxiliar nos cálculos; M - teor de água

- **RC-02** - Rápida Resposta de Leitura → Logo após o enchimento da cuba sensora com sementes de milho, a leitura se estabiliza instantaneamente. Além disso, o *software* do C.L.P. (programa de controle, em anexo) faz a média de seis medidas de teor de água a cada 0,6 segundos. Isso colabora para que a leitura tenha uma menor variação, mesmo estando os grãos já acomodados dentro da cuba. Estas médias podem continuar sendo tomadas durante o tempo que o operador estipular para leitura, que varia de dois a dez segundos. Portanto este requisito foi atendido;
- **RC-03** - Resistência às Intempéries → Este requisito é especialmente necessário para os sistemas eletrônicos. O C.L.P. e os módulos de conversão para adequação da alimentação elétrica dos componentes eletrônicos serão instalados dentro da cabina da colhedora. Atualmente, tais colhedoras vem com cabinas fechadas e climatizadas para conforto do operador, de modo a garantir um ambiente adequado para o sistema eletrônico. O único sistema que é instalado fora da cabina é a placa eletrônica de medição de teor de água (instalada junto à cuba sensora). Esta estará sujeita às altas temperaturas com exposição ao sol, alta umidade do ar em dias chuvosos e exposição à poeira. No entanto, todos os componentes eletrônicos foram escolhidos para trabalhar em largas faixas de temperatura (a maioria de 0 a 60 °C). As eventuais alterações que os componentes sofrem com a variação da temperatura são corrigidos pelo sistema de correção automático implementado (ver item 4.6.1). Com relação à umidade do ar e poeira, a placa se encontra protegida por uma tampa metálica vedada por um *o'ring*, minimizando os efeitos externos. A configuração final de construção do sensor de umidade, mostrando as características descritas, pode ser vista na Fig. 4.18;
- **RC-04** - Simples Operação → O sistema construído possui curva de calibração incorporada, sistema automático de correção de temperatura, filtro (via *software*) por média de leituras (sendo a média automaticamente mostrada no visor do C.L.P) e gravação automática em memória digital logo após a leitura<sup>2</sup>. Ao operador resta a única tarefa de selecionar o tempo de medição de teor de água desejado (tempo para estabilização dos grãos dentro da cuba e realização das médias de leituras);

---

<sup>2</sup>O programa completo é mostrado no Anexo I. No entanto, o módulo de gravação automática em memória digital foi excluído por ser demasiado longo.

- **RC-05** - Compatibilidade com um Controlador Lógico Programável → Como todo o desenvolvimento do sensor de umidade foi direcionado, desde o início, para trabalho em conjunto com um Controlador Lógico Programável, o protótipo final já contempla o C.L.P. Este será usado, então, para automatização de todo o processo de manipulação das amostras e armazenamento dos dados obtidos;
- **RC-06** - Alimentação Elétrica 12 V → A alimentação elétrica de todo o S.M.U. tem de, necessariamente, ser feita pela bateria 12 V da colhedora (única fonte de energia elétrica disponível). No entanto, alguns componentes eletrônicos trabalham com alimentação simétrica  $-12/+12 V_{cc}$ . Esse obstáculo é contornável com a adoção de inversores de frequência  $12 V_{cc}/110 V_{ca}$  e fontes conversoras simétricas  $110 V_{ca}/\pm 12 V_{cc}$  (ou uso de duas fontes  $110 V_{ca}/12 V_{cc}$  em série). Esses módulos de conversão são comuns e de fácil aquisição no mercado, o que contribui para que o próximo requisito também seja atendido;
- **RC-07** - Baixo Custo → O baixo custo do S.M.U. é garantido pelo fato da seleção dos componentes eletrônicos da placa de medição de teor de água e módulos de alimentação e conversão de energia ter sido feita dentre os mais comuns encontrados no mercado nacional. O C.L.P. escolhido é desenvolvido e fornecido por fabricante nacional, estando o *software* de programação disponível gratuitamente para *download* através da página virtual do fabricante. Por fim, o próprio princípio físico de medição, aliado a um projeto eletrônico de grande simplicidade, garantem que os custos de fabricação do S.M.U. serão bastante reduzidos.

#### 4.8 Constatações principais

A seguir apresenta-se a síntese das principais constatações observadas ao longo deste capítulo:

- A temperatura tem efeito não somente sobre as propriedades dielétricas da semente mas também sobre o S.M.U. proposto neste trabalho, sendo constatada uma queda da tensão  $U$  de aproximadamente 1 V quando a temperatura é elevada de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

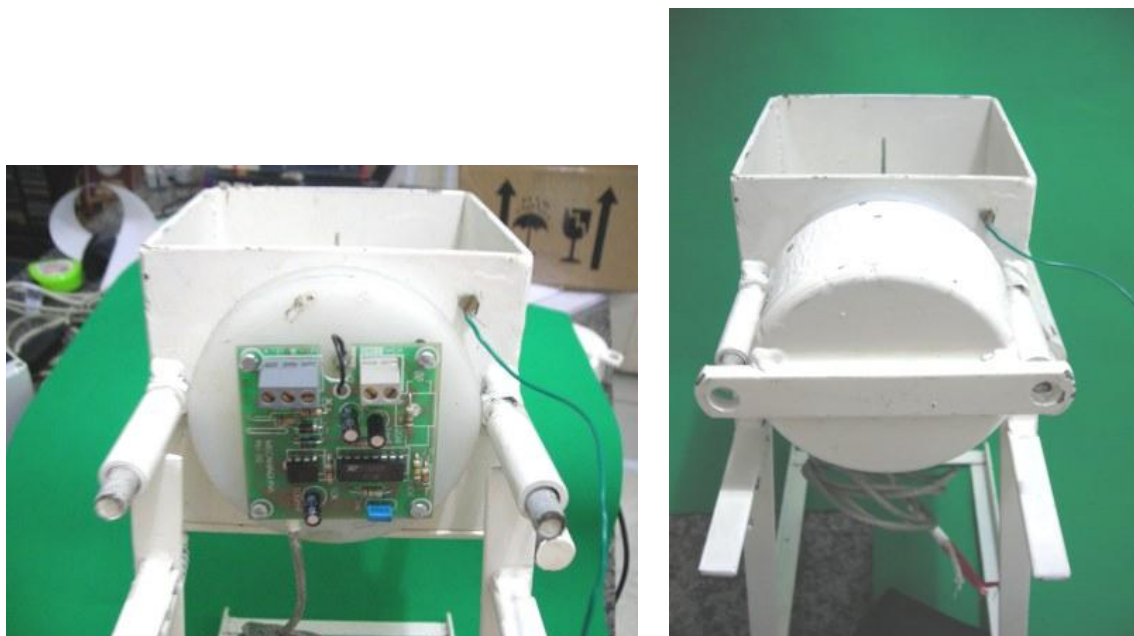


Figura 4.18 – Configuração final do sensor de umidade

- Trocando a Densidade de (R) para (Ch) existe um aumento da tensão  $U$  da ordem de  $0,1 V$ ;
- Não houve constatação de efeito de interação estatisticamente significativo entre temperatura e densidade;
- O efeito da temperatura na tensão de saída  $U$  do S.M.U. é dez vezes maior em ordem de grandeza que o efeito da densidade;
- Foi encontrada uma relação linear entre teor de água e tensão de saída  $U$  para valores abaixo de  $15 \%$ , em acordo com dados da literatura que apontam para uma relação linear entre  $\epsilon$  e o teor de água independentemente da frequência do campo elétrico aplicado;
- O método de umidificação de sementes através da saturação de umidade do ar não permitiu a umidificação das sementes aos níveis desejados para este trabalho, alcançando apenas  $16 \%$  para o milho;
- O método de umidificação de sementes através do embebedimento, com água, de camadas de grãos intercaladas por papel de germinação permitiu a umidificação das sementes a mais de  $30 \%$ , sendo utilizado para a posterior calibração;

- A calibração do S.M.U. foi conseguida com a construção de três modelos lineares (milho seco, úmido e extra-úmido), para uma temperatura média de  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , através de regressão por mínimos quadrados;
- Dada a pequena variação de  $U$  em função da densidade das sementes, este efeito foi desprezado como fonte de erros no S.M.U. proposto;
- Foi desenvolvido um sistema automático de correção de leitura de teor de água em função da temperatura, via *software*, utilizando um sensor de temperatura tipo termoresistor PT-100 para a faixa de temperatura de 10 a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Todos os Requisitos de Construção propostos foram considerados atendidos após o fim da construção do protótipo do S.M.U.



# CAPÍTULO V

## AFERIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE UMIDADE (S.M.U.)

Com a finalização da construção e calibração do protótipo, iniciou-se sua aferição. Foram tomadas amostras de milho em lavoura comercial para comparação dos valores de leitura de umidade do protótipo com outros sistemas de medição. Para comparação das médias fornecidas por cada equipamento, foi utilizado o teste de *Tukey* (teste de comparações múltiplas entre médias de tratamentos (CONAGIN, BARBIN e DEMÉTRIO, 2008)).

### 5.1 Procedimento Experimental

O protótipo do S.M.U. foi comparado a quatro outros sistemas de medição. Dois deles são equipamentos utilizados na etapa de calibração (*G800* e estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Outros dois complementam a aferição: *G400*<sup>1</sup> e *Universal*<sup>2</sup>.

As amostras de milho (híbrido AG 7088) foram obtidas de lavoura comercial localizada na Fazenda Pombo, município de Uberlândia - MG, situada à latitude de  $18^{\circ}55'28,209''$  Sul, longitude de  $48^{\circ}06'51,939''$  Oeste e altitude de 851 metros. A instalação do experimento foi feita em fevereiro de 2008, quando o teor de água de grãos estava em 40 %. O delineamento experimental foi de blocos casualizados com quatro repetições e duas repetições dentro do bloco,

---

<sup>1</sup>Medidor indireto de umidade Geole® *G400*, portátil, comercializado pela Indústria e Comércio Eletro Eletrônica Gehaka

<sup>2</sup>Medidor indireto de umidade *Universal*, resistivo, medição executada pela resistência elétrica de uma amostra submetida a uma compressão pré-determinada feita através de megômetro, comercializado pela Indústria e Comércio Eletro Eletrônica Gehaka

distribuídos em esquema fatorial 4x5. O primeiro fator foi constituído pelos níveis de umidade pré-estabelecidos de 14; 18; 22 e 26 %, enquanto o segundo fator pelos sistemas de medição e identificados como se segue:

1. *E* - Estufa a 105 °C
2. *P* - Protótipo
3. *G* - Medidor de umidade *G*800
4. *Ge* - Medidor de umidade *G*400
5. *U* - Medidor de umidade Universal

As parcelas foram formadas por quatro fileiras de duzentos centímetros de comprimento, espaçamento de oitenta centímetros, sendo cinco plantas por metro. A área útil possuía duas linhas centrais com bordadura de cinquenta centímetros em cada extremidade. As amostras (dez espigas por parcela) foram colhidas manualmente da área útil. A Figura 5.1 ilustra a configuração do experimento (parcela identificada pelo sistema de medição seguido do nível de umidade) e a Fig. 5.2 mostra o esquema da parcela.

Bloco I

P26	Ge22	G18	E18	Ge14	Ge26	U14	P18	P14	E14	E26	U26	G26	P22	G22	U18	Ge18	E22	E14	U22
-----	------	-----	-----	------	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----

Bloco II

E22	Ge26	P22	U14	P14	U22	P26	Ge18	Ge22	G14	U26	Ge14	E14	G18	E26	P18	U18	G26	E18	G22
-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Bloco III

E14	Ge18	P14	Ge22	U26	E26	Ge14	G14	U22	G26	U18	E18	E22	G22	P18	P22	Ge26	U14	P26	G18
-----	------	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----

Bloco IV

U26	E22	G26	U18	Ge18	G14	E18	G22	P22	P18	U14	E26	P14	P26	Ge14	E14	Ge22	G18	U22	Ge26
-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	------	-----	-----	------

Figura 5.1 – Esquema do experimento em campo, instalado na fazenda Pombo para aferição do S.M.U., município de Uberlândia, MG

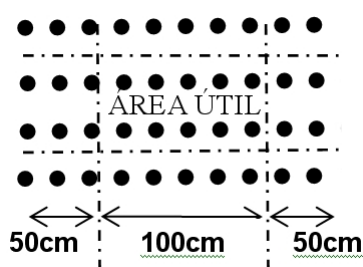


Figura 5.2 – Detalhe da unidade experimental do experimento conduzido para aferição do S.M.U. na fazenda Pombo, município de Uberlândia, MG

Após colhidas, as espigas foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e transportadas até o Laboratório de Análise Sementes do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia. No laboratório, as espigas foram despalhadas e debulhadas manualmente. A massa de grãos, resultante de cada parcela, foi homogeneizada e imediatamente submetida aos medidores de umidade. Os testes foram realizados em sala climatizada a uma temperatura média de  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  com o intuito de evitar a interferência da temperatura sobre a leitura de umidade dos grãos. Foram avaliadas duas repetições para cada amostra, em cada equipamento. Quando era constatada discrepância superior a 0,5 % entre as leituras, repetia-se o procedimento.

## 5.2 Resultados

A Tabela 5.1 contém os valores médios<sup>3</sup> de teor de água obtidos dos ensaios de aferição. Os valores médios fornecidos pelo método Estufa foram tomados como valores de referência pois, segundo as Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 1992), é o método padrão.

A 14 %, somente a leitura do S.M.U. foi estatisticamente igual ao método Estufa. A 18 %, os equipamentos Universal, G800 e G400 superestimaram a leitura padrão e o S.M.U. subestimou este valor. A 22 %, aqueles equipamentos igualaram-se à Estufa e o S.M.U. subestimou a leitura padrão. A 26 %, todos diferiram do método padrão tendo subestimado a leitura obtida com a Estufa.

A Figura 5.3 apresenta os dados da Tab. 5.1 em forma de gráfico. Nota-se que valores

<sup>3</sup>Médias acompanhadas de mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey a 5 %.

Tabela 5.1 – Valores de teor de água (%) obtidos pelos sistemas de medição, com amostras coletadas em diferentes graus de teor de água, para aferição do protótipo

Sistemas de medição de umidade					
Umidade-alvo	Estufa	Protótipo	Universal	G800	G400
14	14,6 c	14,8 c	16,4 a	15,3 b	16,5 a
18	18,5 b	15,9 c	19,8 a	19,4 a	19,9 a
22	20,5 a	16,9 b	20,8 a	20,5 a	20,7 a
26	24,7 a	19,2 c	23,0 b	23,0 b	23,4 b

de umidade-alvo abaixo de 22 %, os três sistemas de medição indireta evidenciam um erro (em diferentes graus) que superestima a leitura de umidade (comparados à estufa). Para umidades acima de 22 % o comportamento inverte-se. Estes resultados sugerem a recalibração dos três sistemas, visto que os erros foram estatisticamente significativos.

O S.M.U. mostrou leitura correta apenas a 14 %. Leituras acima de 14% subestimaram a leitura da estufa. Pelo gráfico, nota-se uma tendência de aumento do erro com o aumento do teor de água.

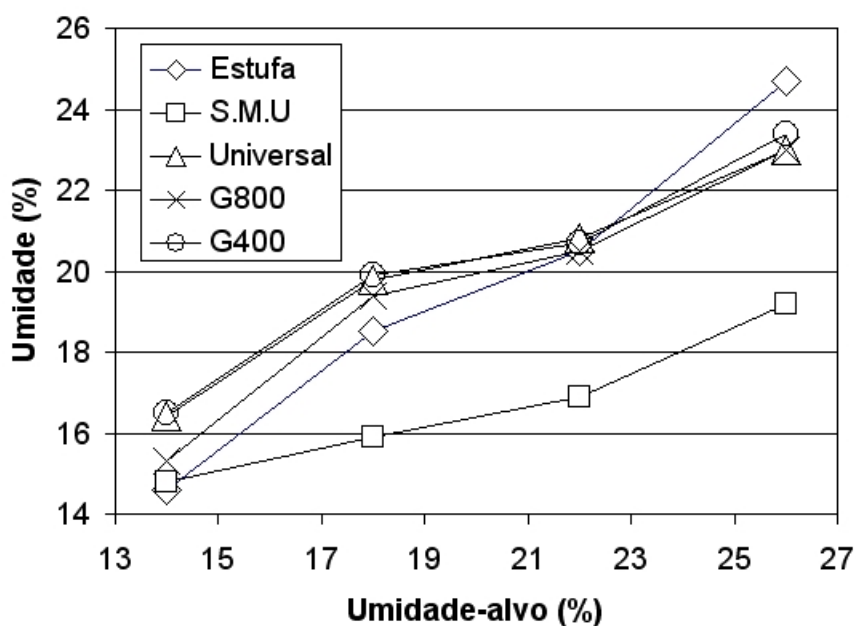


Figura 5.3 – Valores de teor de água (%) obtidos pelos sistemas de medição, com amostras coletadas em diferentes graus de teor de água, para aferição do protótipo

### 5.3 Discussão sobre os erros observados na aferição

Dos resultados obtidos surge a pergunta: Qual a causa para que o protótipo tenha apresentado os maiores erros comparados aos dos outros sistemas de medição? A explicação encontrada para tal diferença está relacionada com o procedimento adotado de umidificação das sementes (item 4.2).

Apesar dos cuidados tomados para que a água adicionada fosse completamente adsorvida pelas sementes, situação verificada visualmente, acredita-se que tal fato não tenha acontecido de forma completa. A seguir apresenta-se algumas hipóteses que podem explicar os erros observados:

1. A superfície das sementes continha micro-partículas de água livre. A presença de água em seu estado livre teria provocado as leituras subestimadas de tensão;
2. A água absorvida apresentou ligações mais fracas, estando focalizada nos espaços intergranulares e dentro dos poros do material. Neste caso, como descrito por Carvalho (1994), atuariam apenas forças capilares. A união água/semente seria tão fraca que a água, nessa condição, manteria todas as suas propriedades do estado livre.
3. O processo natural de adsorção e desorção de água das sementes apresenta histerese na leitura de umidade. Carvalho (1994) ilustra a histerese existente neste processo através de um esquema de isoterma de sorção de água (Fig. 5.4).

A fim de comprovar que a preparação das amostras foi inadequada, um experimento comparativo foi montado. Uma nova calibração foi realizada com amostras de milho obtidas pela secagem natural das sementes. As amostras foram tomadas de espigas da bordadura e colhidas em espaços regulares de tempo, conforme fossem secando naturalmente na planta. Tão logo o teor de água desejado fosse atingido, era colhida uma amostra e imediatamente feita sua medição. A faixa de teor de água de trabalho compreendeu valores entre 10 e 30 %. O medidor de umidade utilizado foi um medidor portátil Dickey-John devido este procedimento não objetivar a calibração final do sensor de umidade, tendo caráter exclusivamente comparativo. A primeira leitura foi feita com 31 % de teor de água.

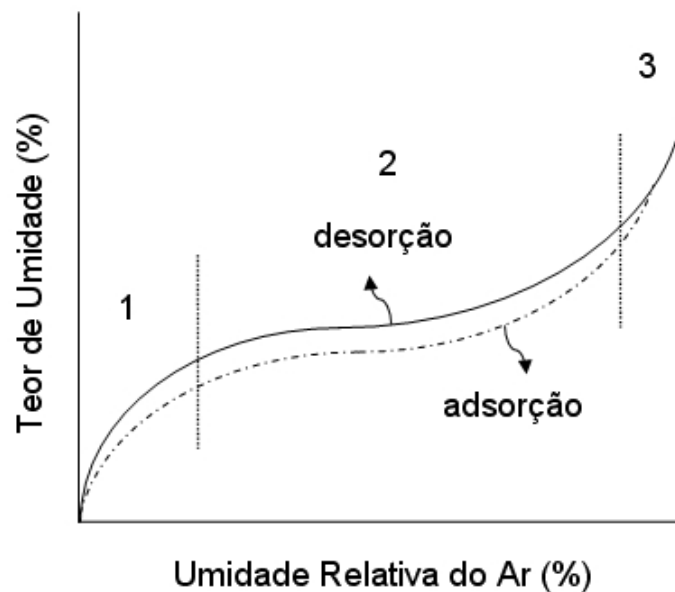


Figura 5.4 – Isoterma de sorção de água em sementes em função da umidade relativa do ar (CARVALHO, 1994)

A curva de calibração obtida com amostras de milho em seu estado natural de umidade foi comparada com a curva de calibração para o milho a 24 °C (Fig. 4.9), estando o resultado final apresentado na Fig. 5.5.

Observa-se o erro na calibração do S.M.U. Quanto maiores são os valores de teor de água maiores são os erros, subestimando o valor correto. Este resultado está de acordo com o comportamento do gráfico da Fig. 5.3, o que reforça a tese de que o procedimento de umidificação utilizado não é adequado para a calibração do S.M.U.

Entretanto, as curvas aproximam-se de uma função cúbica, como já proposto no item 4.4.2. Apesar da interferência externa provocada pelo erro na preparação das amostras, a calibração produziu resultados qualitativamente semelhantes aos da calibração através da secagem natural das sementes.

Esta semelhança é evidenciada pela existência de três regiões distintas na curva de calibração a 24 °C (Fig. 4.9). Como delimitado no item 4.5.1, a primeira estende-se até 15 % de teor de água, a segunda entre 15 e 23 % e a terceira acima de 23 %. Tal comportamento repetiu-se quando feito experimento medindo o teor de água em condições naturais de desidratação.

O resultado acima concorda com a teoria apresentada por Carvalho (1994) referente às diferentes formas com que a água se liga às moléculas da matéria seca. Carvalho (1994) cita

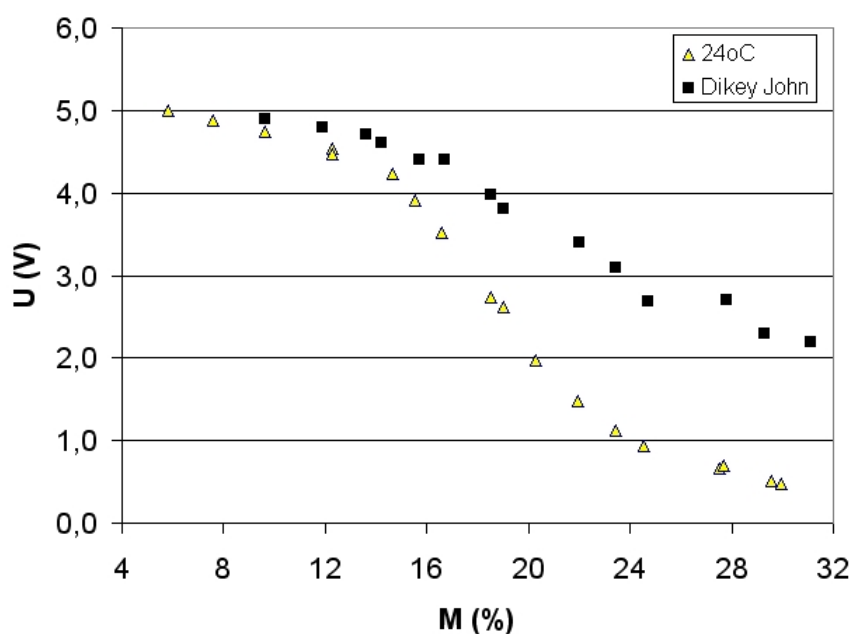


Figura 5.5 – Comparação entre curva de calibração a 24 °C em condições de laboratório e dados obtidos com medidor de umidade portátil Dikey John em condições de campo

autores que sugerem quatro faixas de teor de água dentro das quais a água apresenta forma característica de ligação (item 2.3), a saber: 0 a 5 %, 5 a 13 %, 13 a 27 % e acima de 27 % (nesta última a água encontra-se no estado livre). A existência de faixas de teor de água com ligações diversas entre as moléculas de água e a matéria seca sugere uma explicação para o fato dos dois tipos de calibração terem apresentado o mesmo comportamento em faixas de teor de água distintas.

Apesar de não ser interesse direto deste trabalho, o estudo da variação de  $\epsilon$  com a frequência em materiais agrícolas necessita de avanços. Mesmo não tendo sido feito nenhum trabalho experimental nesta direção, apresenta-se a seguir uma explicação para a influência da frequência na constante dielétrica de sementes. Esta explicação é baseada nos estudos feitos ao longo deste trabalho, sendo a compilação dos resultados de alguns trabalhos com a aplicação da teoria dos mecanismos de polarização.

Como descrito no item 2.4.2, Nelson (1991) destaca um fenômeno importante para a explicação da variação das propriedades dielétricas de um material em função da variação da frequência: a orientação (induzida pelo campo elétrico alternado aplicado) de moléculas que possuem dipolos permanentes.

Da Figura 2.2 tem-se que, para um dipolo, o primeiro tipo de polarização a cessar

com o aumento da frequência é o de orientação. Este tipo de polarização está relacionado com moléculas que possuem ligações covalentes, sendo o caso da água no estado "livre" ou "preso" e das moléculas complexas que constituem a matéria seca de uma semente. Portanto, com o aumento da frequência, a contribuição dos dipolos excitados via polarização por orientação na constante dielétrica  $\epsilon$  deixa de existir. Essa, provavelmente, seria, a primeira frequência de relaxação de um material agrícola qualquer.

A segunda frequência de relaxação provável estará relacionada com o cessamento da contribuição dos dipolos excitados via polarização iônica, contida nos íons presente nas sementes.

Aumentando ainda mais a frequência, restaria apenas a polarização eletrônica, cuja contribuição ocorre do deslocamento induzido do centro de cargas positivas e negativas de cada átomo que constitui o dieleto em função do campo elétrico alternado.

Guerra (2004), em seu estudo sobre a dispersão dielétrica em materiais ferroelétricos, cita que a polarização por deslocamento elástico (que inclui as polarizações eletrônica e iônica) é importante em períodos de tempo correspondentes às oscilações de frequências óticas na região ultra-violeta do espectro ( $10^{-15}$  a  $10^{-14}$ s), para o caso eletrônico. Para a polarização iônica, tem-se um tempo comparável com o período de oscilação natural dos íons em torno de sua posição de equilíbrio, observada na região infravermelho do espectro ( $10^{-13}$  a  $10^{-12}$ s).

Mais detalhes sobre as regiões de polarização podem ser vistos na Fig. 5.6. Nesta figura, é possível acompanhar cada mecanismo (contribuição) que ocorre em uma faixa característica. As regiões onde  $\epsilon$  apresenta as maiores variações são denominadas regiões de dispersão.

Portanto, a polarização por deslocamento (eletrônica ou iônica) acontece em frequências acima das frequências de rádio ou mesmo microondas. Lembrando que as frequências usualmente utilizadas em sistemas de medição de umidade estão nas faixas de rádio-frequência e microondas, tem-se que as contribuições devidas às polarizações por deslocamento não originam dissipação de energia considerável. Resta, então, apenas a polarização por orientação como fenômeno importante para explicar as perdas dielétricas que acontecem no estudo de materiais agrícolas.



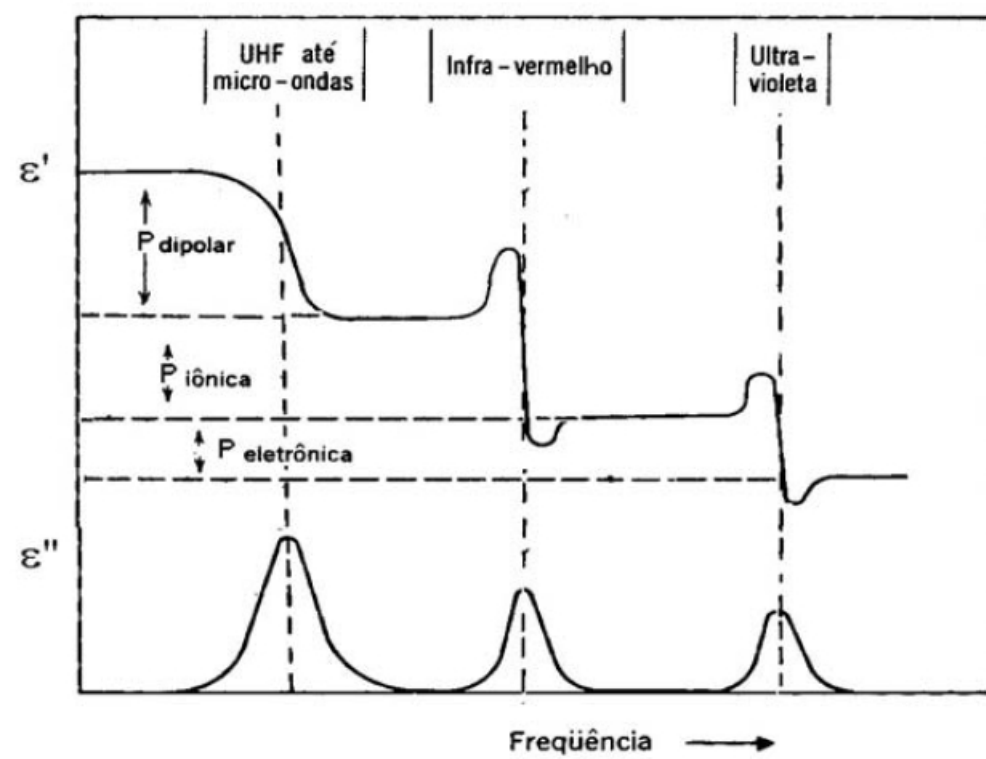


Figura 5.6 – Variação da constante dielétrica e fator de perda com a frequência de um campo elétrico alternado. (GUERRA, 2004)



# CAPÍTULO VI

## CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

- De acordo com os estudos apresentados no item 4.1, onde verificou-se a influência da temperatura e da densidade da amostra de sementes sobre a tensão de saída do sensor, conclui-se que o sensor de umidade construído sofre influência significativa da variação de temperatura e influência desprezível da variação de densidade. Deste modo, foi desenvolvido um sistema automático de correção de leitura de teor de água em função da temperatura (proposto no item 4.6.1);
- Dentre os dois métodos de umidificação de sementes propostos e avaliados no item 4.2, conclui-se que o método de umidificação por embeбimento com água é o mais adequado para a calibração do sensor construído, já que permitiu elevar o teor de água das sementes aos níveis desejados para este trabalho;
- Devido ao comportamento dielétrico das sementes de milho sob as condições impostas pelo S.M.U. construído (descrito e analisado no item 4.5), conclui-se que a calibração do sensor em função do teor de água (para uma temperatura média de  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) é melhor descrita por três retas ajustadas pelo método dos mínimos quadrados. Cada reta corresponde a uma faixa de teor de água que o S.M.U. é capaz de realizar leituras, sendo a primeira faixa correspondente a valores até 15 %, a segunda para valores entre 15 % e 23 % e a terceira

para valores acima de 23%, selecionadas automaticamente pelo programa de controle;

- Dada a discrepância encontrada na aferição do sensor, conclui-se que a calibração utilizada não é correta e deve-se estudar qual(is) motivo(s) ou procedimento(s) levou(aram) ao erro. O item 5.3 discute e sugere a causa como sendo o processo utilizado de umidificação das sementes. Esta afirmação é apoiada nos resultados obtidos de uma nova calibração comparativa utilizando processo natural de secagem das sementes.

## 6.2 Trabalhos futuros

Os resultados obtidos e discutidos permitem que os estudos avancem em diferentes direções. Desta forma, destaca-se a seguir sugestões para trabalhos futuros que podem contribuir para o melhoramento do S.M.U. proposto bem como melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos:

- Avaliar todos os Requisitos de Construção propostos através de testes de campo com colheita de parcelas. O S.M.U. deverá ser montado em uma colhedora convencional de grãos e avaliado conforme metodologia própria para cada requisito;
- Avaliar o efeito de diferentes materiais e dimensões na construção do sensor;
- Realizar um estudo detalhado sobre a influência da forma geométrica do sensor de umidade sobre a uniformidade das linhas de campo nas condições de leitura de umidade do sensor (principalmente com relação ao efeito das bordas);
- Avaliar qualitativa e quantitativamente a influência da pintura na capacitância do sensor construído;
- Avaliar se realmente existe alguma vantagem do modelo da cuba sensora proposta neste trabalho sobre as tradicionalmente empregadas, visto que o modelo proposto procura unir as vantagens do sensor de placas paralelas com as vantagens do sensor de cilindros concêntricos;

- Avaliar a viabilidade de eliminação do efeito da temperatura na leitura de umidade através de *hardware*, sugerindo aqui a introdução de um termoresistor tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) ao circuito eletrônico como meio de correção;
- Estudar os possíveis efeitos de interação entre teor de água, temperatura e densidade através de um planejamento fatorial completo a 3 níveis, verificando também a grandeza do erro de leitura em função da variação de teor de água;
- Avaliar a auto-correção de leitura de umidade do S.M.U em função da temperatura, determinando sua precisão em função da variação da temperatura na faixa de 10 a 45 °C;
- Realizar nova calibração do sensor para milho com o mesmo procedimento experimental adotado neste trabalho, exceto pelo método de umidificação das sementes. Recomenda-se a secagem natural dos grãos;
- Realizar a calibração do sensor de umidade para as outras culturas comuns no Brasil, em especial, sorgo e soja;
- Fazer um estudo sobre o comportamento de  $\epsilon$  com a frequência (visando o entendimento de causa e efeito) a nível estatístico. Uma sugestão seria identificar as classes moleculares existentes em uma semente (amido, óleo, proteína etc) e submetê-las a ensaios de determinação das propriedades dielétricas de cada classe no estado seco (sem a presença de água). Em um segundo estágio, observar as mudanças das propriedades com a **adsorção** de água em seus diferentes níveis (caracterizando água "presa") e as mudanças posteriores com a **absorção** de água (caracterizando água "livre"). Em um estágio final, proceder o modelamento estatístico e avaliar a possibilidade de modelamento numérico.



## CAPÍTULO VII

### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMOODEH, M. T.; KHOSHTAGHAZA, M.H. and MINAEI, S., Acoustic On-line Grain Moisture Meter, Computers and Electronics in Agriculture, vol. 52, 2006, pp. 71-78.

BARBEDO, C. J., Teor de umidade?, Informativo Abrates, vol. 07, n. 3, 1997, pp. 20-21.

BENEDETTI, B. C. e JORGE, J. T., Influência da Variação do Teor de Umidade sobre os Pesos Específicos, Aparente e Real, e a Porosidade de Vários Grãos, Revista Engenharia Agrícola, vol. 11, n. 1, 1987, pp. 7-16.

BERBERT, P. A.; STENNING, B. C.; On-line Moisture Content Measurement of Wheat, Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 65, 1996, pp. 287-296.

BERBERT, P. A.; STENNING, B. C.; Influência do Teor de Umidade nas Propriedades Dielétricas de Sementes de Trigo no Intervalo de 500 kHz a 5 MHz, Revista Engenharia Agrícola, vol. 16, n. 4, 1997, pp. 47-58.

BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUSA, E. F.; DETMANN, E.; VIANA, A. P. e DIONELLO, R. G.; Adaptação da Função Dielétrica  $\epsilon''/(\epsilon'(af\epsilon' - \epsilon''))$  para Determinação do Teor de Água em Sementes de Feijão por Rádio-freqüências, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,

vol. 8, n. 2/3, 2004, pp. 266-273.

BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUSA, E. F.; VIANA, A. P.; DETMANN, E. e CARLESSO, V. O., Avaliação de Três Modelos Dielétricos Derivados da Função  $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$  na Estimativa do Teor de Água de Sementes de Feijão, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 8, n. 1, 2004, pp. 92-101.

BERBERT, P. A.; STENNING, B. C.; QUEIROZ, D. M. e SILVA, J. S., Construção e Avaliação de um Capacitor de Cilindros Concêntricos para Determinação das Propriedades Dielétricas de Grãos, Revista Engenharia Agrícola, vol. 18, n. 1, 1998, pp. 76-91.

BERLIN, H. M., Projetos com A.O. com experiências, Editele - Editora Técnica Eletrônica LTDA, 1ª edição, 1983, 231 pp.

BRACKE, W.; MERKEN, P.; PUERS, R. e VAN HOOFA, C., Design Methods and Algorithms for Configurable Capacitive Sensor Interfaces, Sensors and Actuators A 125, ELSEVIER, 2005, pp. 25-33.

BRASIL, Regras para Análise de Sementes, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, Departamento Nacional de Defesa Vegetal, Coordenação de Laboratório Vegetal, 1992, 365 pp.

CALLISTER, W. D., Materials Science and Engineering: An Introduction, John Wiley, CD ROOM, 2003, 820 pp.

CAMPBELL, R.; CAMPBELL, G. and CHRISTENSEN, C., Grain Weighing and Measuring System, INT CI<sup>A01F</sup> 12/50, US5.487.702, 06 Jul 1994, 30 Jan 1996, 10 pp.

CARVALHO, N. M., A Secagem de Sementes, FUNEP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Campus de Jaboticabal, 1994, 165 pp.



CONAGIN, A.; BARBIN, D. e DEMÉTRIO, C. G. B., Modifications for the Tukey Test Procedure and Evaluation of the Power and Efficiency of Multiple Comparison Procedures, *Scientia Agricola Journal*, vol. 65, no.4, 2008, pp. 428-432.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F. and McCONNELL, K. G., *Instrumentation for Engineering Measurements*, New York, John Wiley, 2 ed., 1993, 584 pp.

DEBYE, P., *Polar Molecules*, The Chemical Catalog Co., New York, 1929.

DOEBELIN, E. O., *Measurement Systems: Application and Design*, New York, McGraw-Hill, 1990, 960 pp.

EDIGER, R. J. e BOELTS, R., Grain Moisture Sensor, INT CI<sup>F26B</sup> 13/12, US4.896.795, 15 Jan 1988, 30 Jan 1990, 08 pp.

GUERRA, J. S., *Dispersão Dielétrica em Materiais Ferroelétricos*, 2004, 125 pp. Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

HASTED, J. B., *Aqueous Dielectrics*, Chapman and Hall, London, 1973.

HALLIDAY, D. e RESNICK, R., *Física*, v. 3, 3 ed., editora LTC S.A., 1981, 322 pp.

KIZITO, F.; CAMPBELL C. S.; CAMPBELL, G. S.; COBOS, D.R.; TEARE, B.L.; CARTER, B. and HOPMANS, J.W., Frequency, Electrical Conductivity and Temperature Analysis of a Low-Cost Capacitance Soil Moisture Sensor, *Journal of Hydrology*, vol. 352, 2008, pp. 367-378.

KNÖCHEL, R.; DASCHNER, F; TAUTE, W., Resonant Microwave Sensors for Instantaneous Determination of Moisture in Foodstuffs, *Food Control* 12 - Elsevier Ltd., 2001, pp. 447-458.

KRASZEWSKI, A. W. e NELSON, S. O., Determination of Moisture Content and Bulk Density of Shelled Corn by Measurement of Microwave Parameters, *J. Agric. Engng. Res.*, 58, 1994, pp. 37-46.

KRAUS, J. D. e CARVER, K. R., *Eletromagnetics*, 2.ed, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, 1973, 828 pp.

LAGARES, M. L.; LAGARES Jr, M. L. e PRADO, J. A., Analisador de Parcelas para Pesquisa de Sementes Embarcado em Colheitadeira, INT CI<sup>A01D 45/00</sup>, PI0203176-0, 09 Ago 2002, 06 pp.

LAWRENCE, K. C., FUNK, D. B. e WINDHAM, W. R., Parallel-Plate Moisture Sensor fo Yellow-Dent Field Corn, *Transactions of the ASAE*, vol. 42, n. 5, 1999, pp. 1353-1357

MAMISHEV, A. V., TAKAHASHI, A. R., DU, Y., LESIEUTRE, B.C. and ZAHN, M., Parameter Estimation in Dielectrometry Measurements, *Journal of Electrostatics*, vol. 56, 2002, pp. 465 a 492

MATTHEWS, J., The Design of an Eletrical Capacitance-type Moisture Meter for agricultural use, *Journal of Agricultural Engeneering Research*, Silsoe, vol. 8, n. 1, 1963, pp. 17-30.

NELSON, F. W.; HAWK, K. R.; SMITH, W. F. and PICKETT, T. D., Grain Moisture Sensor, INT CI<sup>G01R 27/26</sup>, US6.285.198 B1, 03 Jul 1997, 04 Set 2001, 06 pp.

NELSON, S. O., Dielectric Properties of Agricultural Products, *IEEE Transactions on Electrical Insulations*, vol. 26, n. 5, 1991, pp. 845-869.

NELSON, S. O., Measurement and Application of Dielectric Properties of Agricultural Products, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, n. 1, 1992, 7 pp.

NELSON, S. O.; KRAZSEWSKI, A. W.; TRABELSI, S.; LAWRENCE, K. C., Using Cereal Grain

Permittivity for Sensing Moisture Content, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 49, n. 3, June 2000, pp. 470-475.

NELSON, S. O.; LAWRENCE, K. C. e KANDALA, C. V. K., Parallel-Plate Impedance Sensing of Moisture Content in Single Seeds and Grain Kernels, IEEE, 1993, pp. 56-58

NELSON, S. O. and STETSON, L. E., Frequency and Moisture Dependence of the Dielectric Properties of Hard Red Winter Wheat, Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 21, 1976, pp. 181-192

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S. e BRUNS, R. E., Como Fazer Experimentos, 2a ed., Editora Unicamp, Campinas - SP, 2003, 401 pp.

ORLANDO, A. F., Calibração de um Termômetro PT-100 como Padrão de Trabalho de um Laboratório de Serviços Metrológicos, Metrologia 2003 - Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Recife - PE, 2003, 06 pp.

PINTO, C. A. R., Desenvolvimento de Um Sistema de Monitoramento a Distância de Umidade de Solo, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, 1997, 102 pp.

PREETHICHANDRA, D. M. G. e SHIDA, K., A Simple Interface Circuit to Measure Very Small Capacitance Changes in Capacitive Sensors, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, No. 6, December 2001, pp. 1583-1586.

RAINS, G. E.; PHELAN, J. J.; SLAVENS, Z. W., KOZICKI, A. and FUNK, R. C., Multiple Frequency Grain Moisture Sensor for Combines, INT CI<sup>G01R 27/08</sup>, US2005/0225334 A1, 06 Jun 2005, 13 Out 2005, 17 pp.

RENDE, A., Desenvolvimento de Um Protótipo para Monitorar a Umidade do Solo: Qualificação

do Comportamento de um Sensor Capacitivo, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, 1999, 103 pp.

RITSUKO, K., Combine Harvester, INT CI<sup>A01D 41/127</sup>, JP2006254725, 28 Set 2006, 18 pp.

SACILIK, K.; TARIMCI, C. and COLAK, A., Moisture Content and Bulk Density Dependence of Dielectric Properties of Safflower Seed in the Radio Frequency Range, Journal of Food Engineering, ELSEVIER, 2006, 6 pp.

SATAKE, T., Cereal Grain Moisture Content Measuring Apparatus, INT CI<sup>G01N 27/60</sup>, US4.403.191, 12 Fev 1981, 06 Set 1983, 07 pp.

SILVEIRA, P. R. e SANTOS, W. E., Automação e Controle Discreto, São Paulo, Editora Érica Ltda, 5 ed., 1998, 235 pp.

TOSHIO, K.; HIROAKI, Y. and MASAHIROSATAKE, N., Moisture Content Measuring Apparatus in Combine Harvester, INT CI<sup>A01F 12/32</sup>, JP2003189733, 08 Jul 2003, 12 pp.

TRABELSI, S.; KRAZSEWSKI, A. W. e NELSON, S. O., New Density-Independent Calibration Function for Microwave Sensing of Moisture Content in Particulate Materials, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 47, No. 3, 1998, pp. 613-622

TRABELSI, S.; NELSON, S. O., Temperature Dependence of Bound Water Dielectric Behavior in Grain, Instrumentation and Measurement Technology Conference - IMTC, 2004, pp. 66-69

TSAMIS; E.D. e AVARITSIOTIS; J. N., Design of Planar Capacitive Type Sensor for Water Content Monitoring in a Production Line, Sensors and Actuators A 118, ELSEVIER, 2004, pp. 202-211.

# CAPÍTULO VIII

## APÊNDICES E ANEXOS

### 8.1 APÊNDICE I - TABELAS

Tabela 8.1 – Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 24°C - primeira etapa

Umidade Alvo (%)	<i>G 800</i>		<i>U(V)</i>	Sub Amostra	<i>t (g)</i>	<i>PI (g)</i>	<i>PF (g)</i>	<i>Uvazio (V)</i>
	<i>umidade atingida (%)</i>	Peso (g)						
10	8,9	171,5	4,99	1	28,47	111,16	106,28	5,10
	8,8	173,0	4,99	2	28,91	110,52	105,83	
15	16,4	165,7	4,24	3	17,92	99,33	87,34	5,12
	17,0	163,9	4,22	4	26,41	105,76	94,19	
20	20,2	156,0	2,58	5	17,75	95,20	80,48	5,09
	20,3	157,2	2,65	6	24,54	96,96	83,20	
25	26,0	145,6	0,69	7	24,64	90,46	72,12	5,10
	26,0	136,5	0,70	8	25,88	91,36	73,36	
30	29,3	136,5	0,44	9	25,82	89,11	70,38	5,11
	29,0	146,2	0,59	10	30,14	95,00	75,82	
35	30,4	138,0	0,48	11	23,71	87,78	68,60	5,12
	30,9	139,3	0,48	12	25,96	87,62	69,16	

Tabela 8.2 – Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 24°C - segunda etapa

Umidade Alvo (%)	<i>G 800</i>		<i>U(V)</i>	Sub Amostra	<i>t (g)</i>	<i>PI (g)</i>	<i>PF (g)</i>	<i>Uvazio (V)</i>
	<i>umidade atingida (%)</i>	Peso (g)						
10	9,9	169,6	4,88	1	28,48	107,67	101,61	5,10
	9,8	169,5	4,87	2	28,91	107,37	101,45	
12	12,1	169,3	4,74	3	17,93	102,86	94,59	5,10
	12,1	175,0	4,75	4	26,41	106,20	98,56	
14	14,7	171,6	4,55	5	17,75	100,78	90,46	5,09
	15,1	172,3	4,54	6	24,54	104,81	95,05	
18	18,9	150,4	2,72	7	24,65	92,44	79,81	5,10
	19,1	152,1	2,74	8	25,88	93,35	80,90	
22	22,8	144,4	1,15	9	25,83	90,99	75,76	5,11
	22,2	145,0	1,09	10	30,15	94,99	79,75	
24	25,8	139,5	0,6	11	23,72	88,25	70,58	5,11
	26,2	141,0	0,71	12	25,97	86,33	69,60	

Tabela 8.3 – Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 24°C - terceira etapa

Umidade Alvo (%)	<i>G 800</i>		<i>U(V)</i>	Sub Amostra	<i>t (g)</i>	<i>PI (g)</i>	<i>PF (g)</i>	<i>Uvazio (V)</i>
	<i>umidade atingida (%)</i>	Peso (g)						
14	14,3	169,8	4,47	1	28,48	107,80	97,99	5,10
	14,6	170,5	4,46	2	28,92	107,58	97,95	
17	17,5	168,3	3,93	3	17,92	100,34	87,50	5,09
	17,9	164,6	3,90	4	26,41	99,99	88,54	
18	18,3	163,4	3,53	5	17,75	95,99	83,01	5,09
	18,4	160,3	3,52	6	24,54	99,21	86,80	
21	20,4	152,4	2,04	7	24,64	94,39	80,21	5,12
	20,7	147,4	1,89	8	25,88	93,07	79,44	
22	21,1	150,5	1,47	9	25,83	92,58	77,86	5,11
	21,0	146,8	1,49	10	30,15	97,43	82,70	
24	23,7	143,1	0,957	11	23,72	87,42	71,90	5,12
	23,5	144,7	0,923	12	25,97	92,78	76,28	

Tabela 8.4 – Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 10°C

Umidade Alvo (%)	<i>G 800</i>		<i>U(V)</i>	<i>t (g)</i>	<i>PI (g)</i>	<i>PF (g)</i>	<i>Uvazio (V)</i>	T (°C)
	<i>umidade atingida (%)</i>	Peso (g)						
11	11,2	180,1	5,37	25,10	116,19	108,19	5,55	12,0 a 12,1
	11,4	173,8	5,35	35,39	129,50	121,29	5,54	11,4 a 12,2
14	14,1	173,0	5,02	23,63	113,31	102,61	5,59	11,4 a 12,3
	14,4	168,1	5,05	28,69	108,51	99,09	5,55	10,5 a 12,0
17	15,9	166,5	4,72	29,17	112,23	100,14	5,44	11,8 a 12,1
	16,4	168,6	4,75	24,64	102,54	91,20	5,54	10,9 a 11,6
23	20,9	149,3	1,88	25,10	104,46	86,85	5,52	10,8 a 12,8
	21,0	143,9	2,16	24,58	90,71	75,78	5,51	11,1 a 11,7
29	26,8	143,3	0,42	24,28	87,12	69,65	5,51	11,5 a 12,6
	27,3	145,5	0,52	24,60	97,60	76,92	5,52	10,9 a 11,8

Tabela 8.5 – Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 17°C

Umidade Alvo (%)	<i>G 800</i>		<i>U(V)</i>	<i>t (g)</i>	<i>PI (g)</i>	<i>PF (g)</i>	<i>Uvazio (V)</i>	T (°C)
	<i>umidade atingida (%)</i>	Peso (g)						
11	11,5	180,0	5,12	24,33	115,92	107,78	5,32	17,1 a 17,6
	11,7	177,6	5,13	28,02	117,45	109,35	5,36	17,4 a 18,1
14	14,5	172,6	4,81	17,30	98,19	88,44	5,36	17,0 a 17,6
	14,8	171,6	4,84	28,61	106,20	96,95	5,37	17,6 a 18,2
17	17,2	169,5	4,37	32,42	121,50	108,60	5,35	17,5 a 17,7
	17,1	168,9	4,49	31,17	104,73	93,85	5,40	17,5 a 17,6
23	20,9	146,7	1,72	25,83	94,14	78,85	5,35	16,4 a 16,8
	21,5	153,1	1,83	21,16	91,22	75,93	5,32	18,1 a 18,3
29	26,1	143,8	0,72	25,22	102,50	80,98	5,27	16,4 a 17,4
	26,3	141,3	0,77	29,78	97,06	78,06	5,34	16,7 a 17,4

Tabela 8.6 – Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 35°C

Umidade Alvo (%)	<i>G 800</i>		<i>U(V)</i>	<i>t (g)</i>	<i>PI (g)</i>	<i>PF (g)</i>	<i>Uvazio (V)</i>	T (°C)
	<i>umidade atingida (%)</i>	Peso (g)						
11	12,1	178,9	4,53	24,32	115,59	107,39	4,85	33,7 a 35,1
	12,0	172,2	4,53	24,60	115,61	107,20	4,85	33,4 a 34,8
14	14,4	171,7	4,22	28,69	108,98	99,39	4,84	34,3 a 35,1
	14,8	173,7	4,22	28,01	116,25	105,73	4,85	34,6 a 35,1
17	18,4	163,4	3,27	23,89	96,85	85,69	4,84	33,6 a 35,7
	18,3	162,8	3,34	24,64	99,46	88,06	4,83	34,7 a 35,3
23	22,7	147,5	0,94	30,01	106,46	89,14	4,83	34,3 a 35,6
	22,5	144,9	1,07	29,70	95,45	80,42	4,84	34,4 a 34,7
29	27,6	136,6	0,57	28,30	107,70	85,64	4,83	34,4 a 34,9
	27,2	139,7	0,58	26,70	101,24	80,02	4,72	35,2 a 35,9



Tabela 8.7 – Dados obtidos na calibração do Sistema de Medição de Umidade com sementes de milho a 45°C

Umidade Alvo (%)	<i>G 800</i>		<i>U(V)</i>	<i>t (g)</i>	<i>PI (g)</i>	<i>PF (g)</i>	<i>Uvazio (V)</i>	T (°C)
	<i>umidade atingida (%)</i>	Peso (g)						
11	12,0	175,9	4,26	28,29	122,63	114,01	4,59	44,6 a 45,8
	11,9	181,0	4,24	35,39	131,91	123,15	4,57	44,4 a 45,3
14	14,9	172,6	3,90	25,10	112,67	102,13	4,60	44,4 a 44,9
	14,5	172,1	3,90	25,22	113,28	102,88	4,58	44,5 a 45,0
17	18,2	164,0	2,94	32,41	121,45	108,18	4,58	44,5 a 45,3
	18,1	169,3	2,88	25,82	103,22	91,35	4,59	44,3 a 45,9
23	22,6	143,6	0,99	25,09	98,23	81,79	4,45	44,0 a 44,9
	22,2	151,6	0,92	29,78	99,32	83,80	4,53	44,3 a 45,1
29	28,0	142,8	0,65	27,38	101,32	80,54	4,50	44,2 a 45,0
	28,9	136,9	0,64	26,41	92,71	74,33	4,66	44,7 a 45,8

## 8.2 APÊNDICE II - EQUAÇÕES DE REGRESSÃO

- $\hat{U}_{seco10^{\circ}C} = 6,30 - 0,11M$
- $\hat{U}_{seco17^{\circ}C} = 6,26 - 0,12M$
- $\hat{U}_{seco35^{\circ}C} = 6,44 - 0,20M$
- $\hat{U}_{seco45^{\circ}C} = 6,40 - 0,22M$
- $\hat{U}_{umido10^{\circ}C} = 9,80 - 0,35M$
- $\hat{U}_{umido17^{\circ}C} = 9,63 - 0,36M$
- $\hat{U}_{umido35^{\circ}C} = 8,02 - 0,31M$
- $\hat{U}_{umido45^{\circ}C} = 6,98 - 0,27M$
- $\hat{U}_{extra-umido10^{\circ}C} = 8,13 - 0,27M$
- $\hat{U}_{extra-umido17^{\circ}C} = 5,61 - 0,17M$
- $\hat{U}_{extra-umido35^{\circ}C} = 2,78 - 0,078M$
- $\hat{U}_{extra-umido45^{\circ}C} = 2,17 - 0,054M$

### 8.3 APÊNDICE III - PROGRAMAS EM MATLAB

#### PROGRAMA I

```

clear ;

freq_max = 120000*2*pi; % maxima frecuencia a ser analisada (Valor em Hz*
                        % 2pi para dar em radianos/s)
int_freq = 2000*2*pi;   %intervalos entre frecuencias (recomendo um
                        % valor que de "num_pontos_omega" maximo
                        % de 10000 pontos

omega = (1:int_freq:freq_max);
num_pontos_omega = freq_max/int_freq;

R1 = 10e3 %ou 100e3 Omhs

% FRF para C = 29pF (sensor vazio)

%R1 = 1000e3
R2 = 10e9
C = 29e-12

K = (R2/(R1+R2))
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)

for i = 1:num_pontos_omega,
    qoqvazio(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
end

xlabel('Frequencia (Hz)')
```

```
ylabel('Us/Us')

grid

hold

plot(omega/(2*pi), qoqivazio, '-.')

% FRF para C = 88pF (milho 11% umidade)

R2 = 1e9
C = 88e-12

K = (R2/(R1+R2))
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)

for i = 1:num_pontos_omega,
    qoqionze(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
end

figure(1)

plot(omega/(2*pi), qoqionze, '-.')

% FRF para C = 300pF

R2 = 1e9
C = 300e-12

K = (R2/(R1+R2))
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)
```

```

for i = 1:num_pontos_omega,
    qoqi(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
end

figure(1)

plot(omega/(2*pi), qoqi, '+')

% FRF para C = 500pF

R2 = 1e9
C = 500e-12

K = (R2/(R1+R2))
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)

for i = 1:num_pontos_omega,
    qoqi(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
end

figure(1)

plot(omega/(2*pi), qoqi, '--')

% FRF para C = 700pF

R2 = 1e9
C = 700e-12

```

134

```
K = (R2/(R1+R2))
```

```
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)
```

```
for i = 1:num_pontos_omega,
```

```
    qoqi(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
```

```
end
```

```
figure(1)
```

```
plot(omega/(2*pi), qoqi, '*')
```

```
% FRF para C = 1000pF
```

```
R2 = 1e9
```

```
C = 1000e-12
```

```
K = (R2/(R1+R2))
```

```
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)
```

```
for i = 1:num_pontos_omega,
```

```
    qoqi(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
```

```
end
```

```
figure(1)
```

```
plot(omega/(2*pi), qoqi, '-.')
```

```
% FRF para C = 2000pF
```

```
R2 = 1e9
```

```

C = 2000e-12

K = (R2/(R1+R2))
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)

for i = 1:num_pontos_omega,
    qoqi(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
end

figure(1)

plot(omega/(2*pi), qoqi,'o')

% FRF para C = 3000pF

R2 = 1e9
C = 3000e-12

K = (R2/(R1+R2))
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)

for i = 1:num_pontos_omega,
    qoqi(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
end

figure(1)

plot(omega/(2*pi), qoqi,'x')

% FRF para C = 6500pF (umidade 27%)

```

```
R2 = 380e3
```

```
C = 6500e-12
```

```
K = (R2/(R1+R2))
```

```
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)
```

```
for i = 1:num_pontos_omega,
```

```
    qoqivinteseis(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
```

```
end
```

```
figure(1)
```

```
plot(omega/(2*pi), qoqivinteseis, '.')
```

```
legend('29pF', '88pF', '300pF', '500pF', '700pF', '1000pF', '2000pF', '3000pF', '6500pF')
```



## PROGRAMA II

```

clear ;

freq_max = 120000*2*pi;
% maxima frecuencia a ser analisada (Valor em Hz* 2pi para dar em radianos/s)
int_freq = 2000*2*pi;
%intervalos entre frecuencias (recomendo um valor que de "num_pontos_omega"
%maximo de 10000 pontos
omega = (1:int_freq:freq_max);
num_pontos_omega = freq_max/int_freq;

R1 = 10e3
%R1 = 100e3

% FRF para C = 29pF (sensor vazio)

R2 = 10e9
C = 29e-12

K = (R2/(R1+R2))
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)

for i = 1:num_pontos_omega,
    qoqvazio(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
end

for i = 1:num_pontos_omega,
    fi(i) = (atan(-omega(i)*tal)*(180/pi));
end

```

```

xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('Us/Us')
grid
hold

plot(omega/(2*pi), qoqivazio,'*')

figure
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('Angulo de Fase (graus)')
grid
hold

plot( omega/(2*pi), fi,'*')

% FRF para C = 88pF (milho 11% umidade)

R2 = 1e9
C = 88e-12

K = (R2/(R1+R2))
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)

for i = 1:num_pontos_omega,
    qoqionze(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
end

for i = 1:num_pontos_omega,
    fi(i) = (atan(-omega(i)*tal)*(180/pi));

```

```

end

figure(1)

plot(omega/(2*pi), qoqionze, '.'')

figure(2)

plot( omega/(2*pi), fi, '.'')

% FRF para C = 6500pF (umidade 27%)

R2 = 380e3
C = 6500e-12

K = (R2/(R1+R2))
tal = (R1*R2*C)/(R1+R2)

for i = 1:num_pontos_omega,
    qoqivinteseis(i) = K / sqrt(((omega(i)*omega(i))*(tal*tal)+1));
end

for i = 1:num_pontos_omega,
    fi(i) = (atan(-omega(i)*tal)*(180/pi));
end

figure(1)

plot(omega/(2*pi), qoqivinteseis, '+')

```

```
legend('sensor vazio','milho 11%','milho 27%')
```

```
figure(2)
```

```
plot( omega/(2*pi), fi,'+')
```

```
legend('sensor vazio','milho 11%','milho 27%')
```

```
% Plotando as diferencas entre qoqionze e qoqivinteseis
```

```
for i = 1:num_pontos_omega,
```

```
    diferenca(i) = qoqionze(i) - qoqivinteseis(i);
```

```
end
```

```
figure(3)
```

```
xlabel('Frequencia (Hz)')
```

```
ylabel('Us/Ue(milho 11%) - Us/Ue(milho 27%)')
```

```
grid
```

```
hold
```

```
plot(omega/(2*pi), diferenca, '.')
```

## PROGRAMA III

```
clear ;
clf ;
clc;

% Umidade acima de 15% para calibraçao com funcao 1/x

umidade = [14.65 15.57 16.60 18.54 19.00 20.31 21.97 23.44 24.53
           27.55 27.68 29.58 29.94]' % Valores de umidade estufa (entrada)

tensao = [4.24 3.93 3.53 2.72 2.58 2.04 1.47 1.15 0.96
          0.60 0.69 0.44 0.48]' % Tensao de saida do A.O. retificador (saida)

tensaorep1 = [4.22 3.90 3.52 2.74 2.65 1.89 1.49 1.09 0.92
              0.71 0.70 0.59 0.48]' % Tensao de saida do A.O. retificador,
              % repeticao 01 (saida)

% Informe o numero de experimentos (observacoes) n realizados (livro pagina 215)

n = 13

% Informe o numero de parametros estimados p (para linear p = 2 pois y=a+bx,
% a e b sao parametros estimados)

p = 2

% Informe o numero de repeticoes de cada experimento (de cada obsercaçao)
```

142

```
repeticoes = 2
```

```
y = [tensao; tensaorep1] % Montagem da matriz de observacoes com repeticoes
```

```
yy = [tensao tensaorep1] % usado para calculo do erro puro
```

```
% DEFINICAO DO MODELO (se linear, quadratico etc)
```

```
' USANDO MODELO  $y = b_0 + b_1 \cdot 1/x + \text{erro}$ :'
```

```
Xaux = [ones(n,1) 1./umidade ] % Usado quando nao se normaliza a entrada
```

```
%' USANDO MODELO LINEAR  $y = b_0 + b_1x + \text{erro}$ :'
```

```
%Xaux = [ones(n,1) umidade ] % Usado quando nao se normaliza a entrada
```

```
%' USANDO MODELO QUADRATICO  $y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \text{erro}$ :'
```

```
%Xaux = [ones(n,1) umidade umidade.*umidade] % Usado quando nao se  
normaliza a entrada
```

```
%' USANDO MODELO CUBICO  $y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \text{erro}$ :'
```

```
%Xaux = [ones(n,1) umidade umidade.*umidade (umidade.*umidade).*umidade ]
```

```
% Usado quando nao se normaliza a entrada

% Aqui deve-se repetir Xaux no mesmo tanto de repeticoes de cada experimento

X = [Xaux ; Xaux ]

pause

XtranspX = X'*X

determinante = det(XtranspX)

pause

Xtranspy = X'*y

' A matriz acima é a Xtranspy = X'*y '

pause

' Os coeficientes da regressão são os seguintes: (lembrando que o primeiro
e a media global!)'

b = inv(XtranspX)*Xtranspy

pause

' A resposta estimada fica então: '
```

```

yestimado = X*b

plot(umidade, y(1:n),'o',umidade, y(n+1:(n*repeticoes)),'.', umidade,
yestimado(1:n))
xlabel('1/M (%)')
ylabel('U (V)')
grid
pause

' O erro entre a resposta experimental (real) "y" e a resposta estimada
"yestimado" é: (Obs: A distribuição do erro anterior está mostrada no gráfico!)'

figure
axis([14 30 -2 2])
grid
hold

erro = y - yestimado

w=[1:30]; % De 1 ate o maximo valor de umidade
zeros = w;
zeros = w-w;
plot(w,zeros,'--') % Constroi a linha media "zero"
plot(umidade, erro(1:n),'o',umidade, erro(n+1:(n*repeticoes)),'.')
xlabel('1/M (%)')
ylabel('Residuos (V)')
pause

' A soma quadratica residual SQr (erro quadrático) é: '

```



```
SQr = erro'*erro % Essa operacao fornece um valor unico (A SOMA
QUADRATICA RESIDUAL SQr) dado pela soma dos erros elevados ao quadrado

pause

%% DETERMINACAO DO INTERVALO DE CONFIANCA PARA OS PARAMETROS b ESCOLHIDOS %%

% Estimativa da Media Quadratica Residual MQr ou variancia
(o numero embaixo eh o NGDL dos residuos do modelo escolhido)

s2 = (SQr)/(n-p)

% Matriz de covariancia

cov = inv(XtranspX)*s2

pause

% Desvio padrao dos parametros b0, b1, b2 etc

spa = sqrt(diag(cov))

% Parametros e seu Intervalo de Confianca

t90=tinv(.95,n-p);

b

intervalo_de_b = [b-t90*spa b+t90*spa]
```

```
pause
```

```
SQR=0;
```

```
SQT=0;
```

```
SQr = 0;
```

```
SQep = 0;
```

```
SQfaj = 0;
```

```
mediay = sum(y(1:n*repeticoes))/(n*repeticoes)
```

```
% Calculo da ANOVA
```

```
for i = 1:n,
```

```
    for j = 1:repeticoes,
```

```
        SQR = SQR + (yestimado(i)-mediay)^2;
```

```
        SQr = SQr + (yy(i,j)-yestimado(i))^2;
```

```
        SQfaj = SQfaj + (yestimado(i)-mean(yy(i,1:repeticoes)))^2;
```

```
        SQep = SQep + (yy(i,j)-mean(yy(i,1:repeticoes)))^2;
```

```
        SQT = SQT + (yy(i,j)-mediay)^2;
```

```
    end
```

```
end
```

```
SQR
```

```
SQr
```

```
SQfaj
```

```
SQep
```

```
SQT
```

$p-1$

$n \cdot \text{repeticoes} - p$

$n - p$

$n \cdot \text{repeticoes} - n$

$n \cdot \text{repeticoes} - 1$

pause

'Coeficiente de determinacao do modelo R2 ou % de variacao explicada'

$R2 = SQR/SQT$  % para interpretacao ver pagina 216 do livro

pause

'Maxima variacao explicavel:'

$(SQT - SQep) / SQT$

pause

$MQR = SQR / (p - 1)$

$MQr = SQr / (n \cdot \text{repeticoes} - p)$

$MQfaj = SQfaj / (n - p)$

$MQep = SQep / (n \cdot \text{repeticoes} - n)$

pause

'Estimativa da variancia dos parametros e, depois, a raiz quad.

que e o erro padrao dos parametros:'

148

```
cov = inv(XtranspX)*MQr
```

```
% Desvio padrao dos parametros b0, b1, b2 etc
```

```
spa = sqrt(diag(cov))
```

#### **8.4 ANEXO I - PROGRAMA LADDER DE CONTROLE DO S.M.U.**



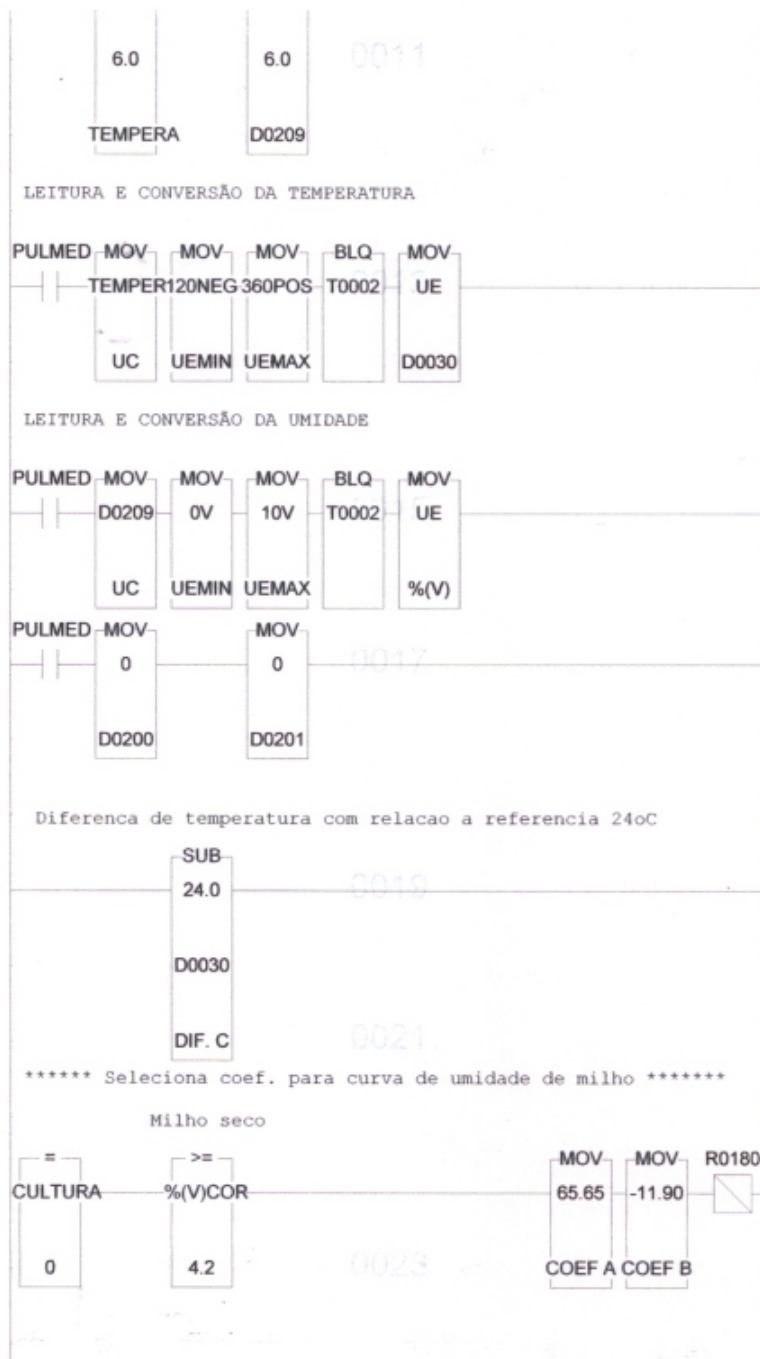
----- [ Entrada analógica ] -----  
 E0001: Temperatura da Semente (0..4092)  
 E0004: Umidade da Semente (0...4092)

----- [ Contato auxiliar ] -----  
 R0071: [100MILI], Tick de 0,1s para aquisição  
 R0072: [PULMED], Pulso para cálculo da méd

----- [ Memória inteira ] -----  
 M0840: Memória EA1 (0...4092)  
 M0841: Memória EA4 (0...4092)  
 M0600: Timer para o filtro das entradas analóg  
 M0285: Contador de aquisições das entradas :

----- [ Memória real ] -----  
 D0200: Auxiliar para cálculo da média em E1  
 D0201: Auxiliar para cálculo da média em E4

----- [ Constante inteira ] -----  
 K0079: [10], Constante inteira, valor = 10  
 K0000: [0], Constante inteira, valor = 0  
 K0001: [K=1], Global Constant [ 1 ]  
 K0005: [K=5], Constante de uso geral [ 5 ]



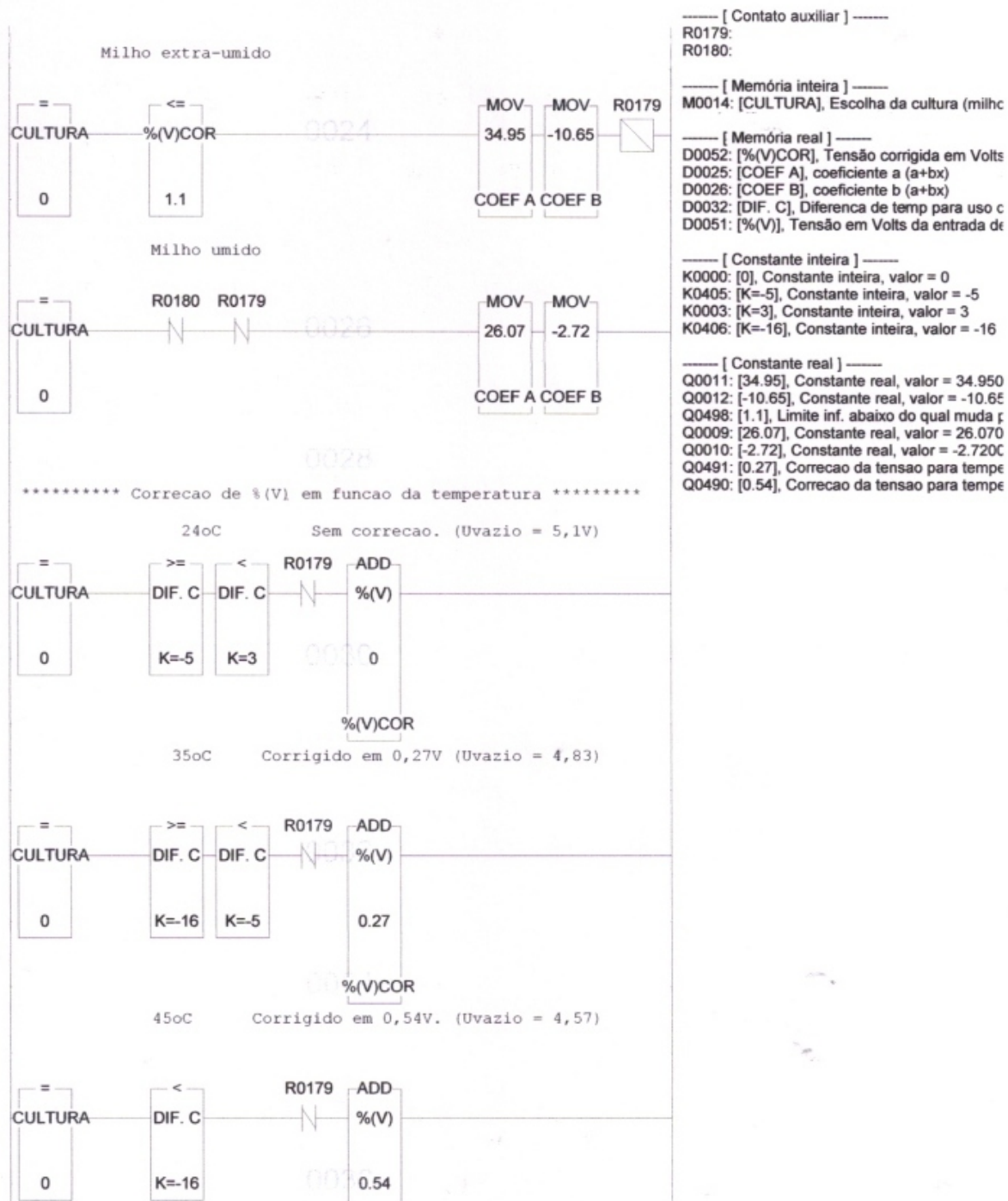
----- [ Contato auxiliar ] -----  
 R0072: [PULMED], Pulso para cálculo da méd  
 R0180:

----- [ Memória inteira ] -----  
 M0014: [CULTURA], Escolha da cultura (milho)

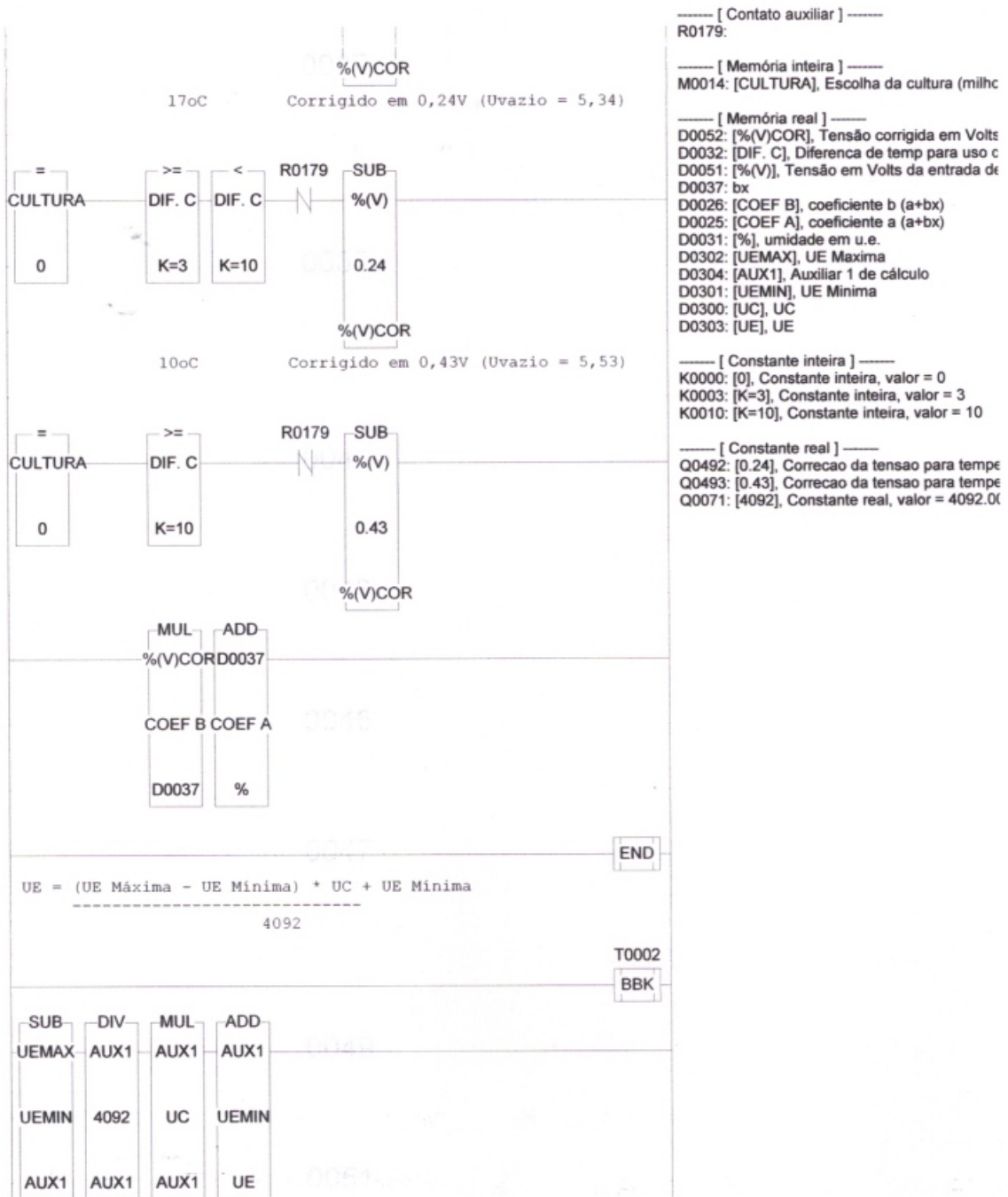
----- [ Memória real ] -----  
 D0208: [TEMPERA], Média de temperatura da  
 D0209: Média de umidade da semente UC (0.  
 D0303: [UE], UE  
 D0300: [UC], UC  
 D0301: [UEMIN], UE Minima  
 D0302: [UEMAX], UE Maxima  
 D0030: temperatura em u.e.  
 D0051: [%V], Tensão em Volts da entrada de  
 D0200: Auxiliar para cálculo da média em E1  
 D0201: Auxiliar para cálculo da média em E4  
 D0032: [DIF. C], Diferença de temp para uso c  
 D0052: [%V]COR, Tensão corrigida em Volts  
 D0025: [COEF A], coeficiente a (a+bx)  
 D0026: [COEF B], coeficiente b (a+bx)

----- [ Constante inteira ] -----  
 K0000: [0], Constante inteira, valor = 0

----- [ Constante real ] -----  
 Q0006: [6.0], Constante real de uso geral [ 6.0  
 Q0072: [120NEG], Constante real, valor = -120  
 Q0073: [360POS], Constante real, valor = 360  
 Q0074: [0V], Constante real, valor = 0.000000  
 Q0075: [10V], Constante real, valor = 10.0000  
 Q0024: [24.0], Constante real, valor = 24.0000  
 Q0007: [65.65], coeficiente A - milho seco [ 65  
 Q0008: [-11.90], coeficiente B - milho seco [ -1  
 Q0497: [4.2], Limite sup. acima do qual muda









EBK