

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**  
**TÂNIA EVELYN OLIVO**

**DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA SOJA POR MEDIDA CAPACITIVA**

**CURITIBA**  
**2010**

**TÂNIA EVELYN OLIVO**

**DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA SOJA POR MEDIDA CAPACITIVA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Área de Concentração em Sistemas Eletrônicos, Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR, como parte das exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro  
Co-orientadores: Prof. Dr. Marcelo Risso Errera  
Prof. Dr. Marlio Bonfim

**CURITIBA  
2010**

## DEDICATÓRIA.

*Dedico este trabalho a minha família, que soube entender a minha ausência nos momentos desde que ingressei no mestrado, até a conclusão desta dissertação. Diante de todas as dificuldades e da imensa saudade, se mantiveram incansáveis em suas manifestações de apoio e carinho.*

## AGRADECIMENTO

Não sou autora única deste trabalho. Divido os seus créditos com todos que me influenciaram e ajudaram a construir estas reflexões. Agradeço, de maneira especial:

Ao colega William Bessa, pela grande dedicação e apoio incansáveis, que permitiu um avanço significativo deste trabalho;

Ao professor orientador Dr. Eduardo Ribeiro Parente, por suas contribuições que foram fundamentais para a conclusão desta pesquisa;

Aos professores Dr. Marlio Bonfim e Dr Marcelo Risso Errera, por todos os seus ensinamentos e por suas valiosas contribuições e sugestões;

Aos meus pais, pela torcida, pelo orgulho e por tudo que eles representam para mim;

A minha irmã, que compreendeu o meu momento de ausência no momento que ela mais precisava, pelo estímulo e por toda história que nos aproxima;

Aos amigos de mestrado que compartilharam comigo esses momentos de aprendizado;

Aos amigos de laboratório, pelo companheirismo, habilidade e atitudes de pesquisadores;

Aos amigos e amigas, que acompanharam a minha jornada, sempre estiveram ao meu lado me apoiando, estimulando, pela cumplicidade e amizade incondicional;

Enfim, a todos aqueles que de uma maneira ou de outra contribuíram para que este percurso pudesse ser concluído.

## RESUMO

Os secadores de grãos raramente fazem uso de controle de malha fechada para verificar a umidade dos grãos durante o processo de secagem. Isto ocorre devido à dificuldade de se obter medidores de umidade em tempo real que operem em temperaturas elevadas dentro do secador. Este trabalho analisa o processo de medição da capacitância em capacitores que utilizam os grãos de soja como dielétrico, com o objetivo de determinar sua umidade. Também, é verificada a influência de fatores externos, como a temperatura. Estabelece um método que permite medir o teor da umidade do grão no próprio secador, com base na propriedade dielétrica da soja. Varias medidas foram realizadas para verificação do grau de precisão deste método. A grande vantagem do método de medida capacitiva é que ele permite a determinação da umidade sem contato elétrico com os grãos que estarão em constante deslocamento.

Palavras-chave: Soja, umidade, medida capacitiva, secagem de grãos, curva de secagem.

## **ABSTRACT**

Grain dryers rarely use closed-loop control to measure the moisture content of soybeans grain during the drying process. This is due to the difficulty to obtaining moisture meters that operate in real time and at high temperatures inside the dryer. This paper analyzes the process of measuring the capacitance of the grains in order to determine its moisture and check the influence of external factors such as temperature. It establishes a method to measure the moisture content of grains inside the dryer, based on the dielectric properties of soy. Several measures were obtained to verify the accuracy of this method. The advantage of capacitive measurement method is that it allows the determination of moisture content of soybeans without electrical contact with the grains that are in constant movement inside the dryer.

Keywords: Soybeans, humidity, capacitive measurement, grain drying, drying curve.

## EPÍGRAFE

*“A mente que se abre a uma nova  
idéia jamais voltará ao seu tamanho  
original.”*

**Albert Einstein**

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....	13
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 O GRÃO DE SOJA.....	16
2.2 CAPACITÂNCIA .....	30
<b>3 DESCRIÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO.....</b>	<b>40</b>
3.1 ESTUFA DE ESTERILIZAÇÃO E SECAGEM DA SÉRIE 400ND .....	40
3.2 BALANÇA ELETRÔNICA – FA 2104N .....	41
3.3 CAPACÍMETRO DIGITAL .....	42
3.4 MULTÍMETRO DIGITAL .....	43
3.5 DESSECADOR DE VIDRO .....	44
3.6 MEDIDOR DE UMIDADE .....	44
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>46</b>
4.1 CAPACITOR CILÍNDRICO E CAPACITOR PARALELO COM BASE DE PROPILENO. ....	46
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES. ....</b>	<b>57</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>75</b>
<b>BIBLIOGRAFIA ADICIONAL.....</b>	<b>78</b>



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - GRÃOS DE SOJA.	18
FIGURA 2.2- SECADOR TIPO FLUXO MISTO EM TORRE.	25
FIGURA 2.3 - ESQUEMA DE FLUXOS PARA SECAGEM CONTINUA, COM RESFRIAMENTO.	26
FIGURA 2.4: TORRE DE SECAGEM MONTADA.	27
FIGURA 2.5 - IMAGEM DO INTERIOR DO SECADOR DO TIPO FLUXO MISTO EM TORRE	28
FIGURA 2.6- ESQUEMA DA MOVIMENTAÇÃO DO AR E DO GRÃO DE SOJA.	29
FIGURA 2.7 - DOIS CONDUTORES, ISOLADOS COM FORMATO QUALQUER, SEPARADO POR UM MATERIAL ISOLANTE (NO CASO O AR).	31
FIGURA 2.8 - MOSTRAM AS LINHAS DE CAMPO ELÉTRICO.	31
FIGURA 2.9 - CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS CARREGADO.	32
FIGURA 2.10 - UM CORTE TRANSVERSAL DE UM CAPACITOR CILÍNDRICO DE COMPRIMENTO L, MOSTRANDO UMA SUPERFÍCIE GAUSSIANA CILÍNDRICA E A TRAJETÓRIA RADIAL DE INTEGRAÇÃO.	34
FIGURA 2.11: REPRESENTAÇÃO DA IMPEDÂNCIA NO PLANO COMPLEXO.	36
FIGURA 2.12: REPRESENTAÇÃO DA IMPEDÂNCIA PARA UM CIRCUITO CAPACITIVO	37
FIGURA 2.13: CIRCUITO PARA MEDIÇÃO DA CAPACITÂNCIA	38
FIGURA 3.1 - ESTUFA DE ESTERILIZAÇÃO E SECAGEM DA SÉRIE 400ND	41
FIGURA 3.2 - BALANÇA ELETRÔNICA - FA 2104N	41
FIGURA 3.3 - CAPACÍMETRO DIGITAL ICEL CD-300	42
FIGURA 3.4 - MULTÍMETRO DIGITAL MIMIPA ET-2651	43
FIGURA 3.5 - DESSECADOR DE VIDRO	44
FIGURA 3.6 - MEDIDOR DE UMIDADE PORTÁTIL G600	45
FIGURA 4.1 - CAPACITOR CILÍNDRICO COAXIAL DE BASE DE POLIPROPILENO.	47
FIGURA 4.2 - CAPACITOR CILÍNDRICO DE BASE DE POLIPROPILENO.	47
FIGURA 4.3: VISTA FRONTAL, VISTA LATERAL E VISTA SUPERIOR DO CAPACITOR PARALELO.	49
FIGURA 4.4: CAPACITOR PARALELO	49
FIGURA 4.5: RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA ( $^{\circ}\text{C}$ ) X CAPACITÂNCIA (PF)	50
FIGURA 4.6 – FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO PARA A OBTENÇÃO DA RELAÇÃO DA CAPACITÂNCIA COM A TEMPERATURA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE UMIDADE.	52
FIGURA 4.7 - A SOJA NOS CADINHOS SENDO COLOCADO NA ESTUFA EM UMA TEMPERATURA DE $130^{\circ}\text{C}$	54
FIGURA 4.8 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE SECAGEM.	55
FIGURA 4.9: CURVA DE SECAGEM (BASE SECA)	56
FIGURA 5.1 – CAPACITÂNCIA PARA CADA TEMPERATURA EM AMBOS OS CAPACITORES.	57
FIGURA 5.2 - CAPACITÂNCIA (PF) VS UMIDADE (BASE SECA) (%)	59
FIGURA 5.3 - CAPACITÂNCIA EM FUNÇÃO DA UMIDADE (BASE SECA) E TEMPERATURA.	59
FIGURA 5.4 - CAPACITÂNCIA VS. UMIDADE (BASE SECA)	61
FIGURA 5.5 - VALORES MÉDIOS DOS GRÃOS DE SOJA DA COOPERATIVA DE APUCARANA COM DUAS INCERTEZAS E REPRESENTADO PELAS BARRAS DE ERROS.	64
FIGURA 5.6 - VALORES MÉDIOS DOS GRÃOS DE SOJA DA COOPERATIVA DE CURITIBA COM DUAS INCERTEZAS E REPRESENTADO PELAS BARRAS DE ERROS	64
FIGURA 5.7 - VALORES MÉDIOS DOS GRÃOS DE SOJA DA COOPERATIVA DE PARAGUAI COM DUAS INCERTEZAS E REPRESENTADO PELAS BARRAS DE ERROS	65
FIGURA 5.8 - VALORES MÉDIOS COM BARRAS DE ERRO DOS GRÃOS DE SOJA DA COOPERATIVA DE APUCARANA.	66
FIGURA 5.9 - VALORES MÉDIOS COM BARRAS DE ERRO DOS GRÃOS DE SOJA DA COOPERATIVA DE CURITIBA.	66
FIGURA 5.10 - VALORES MÉDIOS COM BARRAS DE ERRO DOS GRÃOS DE SOJA DA COOPERATIVA DE PARAGUAI.	67
FIGURA 5.11 - CURVA DE APROXIMAÇÃO DE AMBOS OS CAPACITORES.	68

FIGURA 5.12 – UMIDADE PERCENTUAL BALANÇA VS UMIDADE PERCENTUAL DO MODELO.	69
FIGURA 5.13 – AJUSTE DE CURVA DA UMIDADE PERCENTUAL DO MODELO VS UMIDADE PERCENTUAL DA BALANÇA DE PRECISÃO	72
FIGURA 5.14 – UMIDADE DO MEDIDOR DE UMIDADE (%) VS UMIDADE DO CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS (BASE ÚMIDA).	73

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1- COMPOSIÇÃO MÉDIA DA SOJA (BASE SECA)	18
TABELA 2.2: CONSTANTES DIELÉTRICOS DE ISOLANTES CAPACITORES (TEMPERATURA AMBIENTE)	35
TABELA 3.1 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	40
TABELA 3.2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA BALANÇA ELETRÔNICA [GEHAKA].	42
TABELA 3.3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CAPACÍMETRO DIGITAL ICEL CD-300	43
TABELA 5.1: VARIAÇÃO (%) DO PESO DA AMOSTRA NO PROCESSO DE ESFRIAMENTO.	58
TABELA 5.2: TRATAMENTO DE DADOS DA PESQUISA	63
TABELA 5.3: CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS – ERRO RESIDUAL E DESVIO PADRÃO (BASE SECA)	70
TABELA 5.4: CAPACITOR CILÍNDRICO CONCÊNTRICO - ERRO RESIDUAL E DESVIO PADRÃO (BASE SECA)	71
TABELA 5.5: MEDIDOR DE UMIDADE G600 E O CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS – VARIÂNCIA E DESVIO PADRÃO (BASE ÚMIDA)	73

# 1 INTRODUÇÃO

Secagem de grãos é uma etapa da chamada fase de pós-colheita. O processo de secagem é utilizado para diminuir o teor de umidade dos grãos de soja após a colheita. Com frequência os grãos colhidos apresentam umidade elevada o que não é adequado para o armazenamento (PESKE, 2004). A estocagem do produto na correta faixa de umidade reduz a possibilidade de desenvolvimento de fungos e bactérias. O teor de umidade corresponde à relação percentual entre o peso de água presente e o peso total (percentual base úmida) ou peso da soja sem água livre (percentual base seca). Para que a soja armazenada se conserve em boas condições é necessário considerar dois pontos importantíssimos: o teor de umidade da semente e a temperatura do depósito (MATTOS, 1987). No entanto, para se evitar a proliferação de pragas, sendo estas as responsáveis por afetar a qualidade e deterioração dos grãos de soja, a faixa de umidade e temperatura tem que ser baixa para que o armazenamento se encontre em boas condições. O teor de umidade do grão de soja durante a colheita pode variar gradualmente ao longo dos dias ou das semanas, caso o processo dure o suficiente para que ocorram estas mudanças, ou podem diferir largamente dependendo do campo de cultivo. Na situação em que ocorrem variações significativas no teor de umidade inicial dos grãos, a adoção de mecanismos de controle automático na etapa de secagem é um procedimento capaz de propiciar tanto um produto final mais homogêneo quanto de evitar um consumo excessivo de energia durante o processo.

Existem várias formas de secadores que apresentam suas especificidades conforme as técnicas de secagem para variados tipos de grãos. Essencialmente os secadores de grãos (soja, milho, feijão, etc.) no Brasil são todos parecidos: contínuo de fluxo misto (ERRERA *et al*, 2003). Este equipamento utiliza o ar para fazer a transferência de calor. O ar em contato com o grão libera calor; este se aquece perdendo água por evaporação. O vapor produzido é conduzido para fora da câmara e mais trocas são feitas até que se atinja o nível desejado de secagem. Os métodos de secagem artificial empregam diferentes combinações de temperatura, fluxo de ar, tempo, formas de movimentação dos grãos e de contato ar/grão.

Existem algumas formas de medição do nível de umidade do grão, seja pelo peso ou por determinação de sua resistividade. Estes métodos, porém, necessitam que os grãos sejam retirados do secador e colocados no medidor. Deseja-se um método que possa fornecer, durante o processo de secagem, dentro do próprio

secador, o teor da umidade do grão de soja. Este método de medição em tempo real permitiria um ajuste em malha fechada nos processo de fluxo de ar, temperatura e velocidade de escoamento do grão, aumentando a eficiência do processo de secagem, reduzindo o consumo de energia e o tempo necessário para secar os grãos.

O objetivo deste trabalho é, portanto, buscar uma forma de medir a umidade contida nos grãos de soja utilizando uma forma de medição indireta. Desta forma, mede-se a umidade da soja sem contato direto com os grãos e sem a perda da amostra medida. Assim, a unidade de medida capacitiva foi utilizada como método de medição.

## 1.1 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Medir as propriedades físicas dos frutos e de produtos alimentares tem sido sempre um crescente interesse dos trabalhadores na indústria de alimento.

A secagem de produtos agrícolas pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem que consiste na remoção da umidade excessiva contida no interior do grão por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido. Conforme Boeri (2007), a velocidade do ar de secagem apresenta significativa influência no processo e, verificou uma maior retirada de água dos grãos durante as primeiras horas de secagem. Logo a velocidade de secagem depende da temperatura, umidade relativa, fluxo do ar, do tempo de exposição a estas condições, dos teores de água inicial e final, de características dos grãos e das propriedades da interface grão-ar. Quanto mais elevada é a temperatura e maior é o fluxo de ar, maior será a velocidade de secagem e menor o tempo total de exposição ao ar aquecido.

Usando parâmetros característicos de soja brasileira, Borges (2002) desenvolveu um modelo matemático para secagem, composto por um sistema de quatro equações diferenciais parciais, que relacionam o teor de umidade e a temperatura dos grãos e do ar. O modelo simula o processo, considerando a temperatura e a velocidade do ar de secagem, a velocidade e o teor de umidade inicial dos grãos. Foram realizadas simulações numéricas sobre a influência do ar e da temperatura no teor de umidade dos grãos, logo se observou que para as temperaturas mais baixas a velocidade não tem grande influência. No entanto, para temperatura mais altas (100°C) a influência da velocidade do ar é significativa.

Nota-se que a influência da temperatura do ar de secagem é bem acentuada na diminuição do teor de umidade para condições constantes de velocidade do ar de secagem. Verifica-se também que a influência da temperatura no processo de secagem também é considerável: quanto mais elevada à temperatura, maior a velocidade do processo de secagem. Outro fator observado é que para velocidade nula a saída de água do grão é muito lenta (BOERI, 2007).

As propriedades dielétricas de produtos da agricultura vêm sendo estudadas há bastante tempo com diferentes objetivos. Modelos baseados na propriedade dielétrica do trigo e da soja foram estudados como forma de se determinar o teor de umidade (NELSON, 1991). Também são descritas aplicações como emprego de rádio frequência (RF) e micro-ondas para tratamento de sementes. Essas técnicas visam aprimorar o armazenamento de produtos e o controle de insetos melhorando as características nutricionais dos grãos.

A utilização de micro-ondas em cavidade ressonante já foi demonstrada como forma de se determinar a umidade do grão de soja individualmente (KRASZEWSKI, YOU e NELSON, 1989). A medição da frequência de ressonância e alteração das características de transmissão da cavidade, quando a semente de soja está inserida, fornece as informações necessárias para o cálculo da quantidade de água. Incertezas das medições do conteúdo de massa e umidade eram de 3% e menos que 1% de umidade (KRASZEWSKI, YOU e NELSON, 1989). Teor de umidade de grãos e sementes é uma característica importante que determina a adequação dos produtos para armazenamento, transporte e processamento. Este parâmetro seria a principal variável de controle de um sistema em malha fechada. O peso de cada semente é atualmente de pouco interesse prático. Entretanto, o peso de um conjunto de teste, uma medida da densidade dos grãos ou sementes, é usado porque dá uma indicação da qualidade e é utilizado na classificação comercial do produto.

Em um estudo recente (BAO *et al.*, 2005), os autores reportam medidas da capacitância de grãos de soja realizadas numa faixa de frequência de 1 kHz a 2 MHz. O dispositivo para medição era um capacitor cilíndrico constituído de dois tubos coaxiais de diâmetros 5 cm e 7 cm e 11 cm de comprimento, fixados em uma placa isolante. Os grãos de soja a serem medidos eram depositados no espaço formado entre os dois tubos. O capacitor era ligado a um gerador de sinal e um instrumento de medição. Um sinal senoidal era aplicado para excitar o capacitor. A

tensão de excitação era de 9 V e temperatura ambiente 20°C. O teor de umidade das amostras de soja variava entre de 13% e 60%.

O resultado da análise indicou que a mudança da capacitância (ou constante dielétrica) variou na mesma direção da quantidade de umidade para cada frequência de excitação adotada. Assim, confirmou-se o aumento da constante dielétrica dos grãos em amostras com mais umidade. O fenômeno pode ser explicado: com o aumento no teor de umidade da soja, os dipolos elétricos de moléculas de água livre aumentaram e as propriedades dielétricas foram reforçadas. Os autores perceberam que a maior variação da capacitância se dava para baixas frequências, sendo o melhor resultado obtido para frequência de 1 kHz.

No presente trabalho, buscou-se realizar medidas semelhantes para uma faixa de umidade de maior interesse para a secagem e armazenamento (6 a 12 % base seca - BS).

A dissertação está estruturada da seguinte forma. No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica, onde são estudadas, inicialmente as características da soja, como a estrutura do grão, teor de umidade, descrição botânica e a sua composição química. Em seguida, o estudo retorna para o processo de secagem de grãos, onde enfatiza as formas de processo, o tipo de secador e os fatores que influenciam a secagem. O terceiro capítulo traz a apresentação dos materiais utilizados na realização dos experimentos, explicitando suas aplicações e características. No quarto capítulo é apresentada a metodologia da pesquisa realizada, fazendo-se a descrição dos dispositivos utilizados e dos procedimentos de medição para a realização das medidas da umidade da soja. Os resultados e discussões obtidos através da metodologia empregada nesta pesquisa são apresentados no quinto capítulo. Num primeiro momento, os resultados obtidos com o processo de secagem são apresentados, mostrando a relação entre a capacitância e a umidade contida nos grãos. Ainda, é apresentada a dependência entre a capacitância e a temperatura dos grãos de soja. No último capítulo é apresentada a conclusão da pesquisa a partir dos resultados obtidos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica apresentada aborda inicialmente informações a respeito das características do grão de soja, analisando a estrutura do grão e o teor de umidade. Em seguida, o estudo é direcionado para os métodos de medição de umidade dos grãos de soja, onde são apresentadas as equações que determinam o percentual de umidade dos grãos. Prosseguindo, volta-se o estudo para a secagem da soja, a obtenção de curvas de secagem e para os diferentes tipos de secadores. Também, faz-se um estudo sobre capacitância e seus fundamentos básicos, apresentando, inclusive, dois modelos geométricos de construção de capacitores. Finalmente, é feito o equacionamento matemático dos capacitores em circuitos elétricos e é apresentada uma forma de se determinar a capacitância de um capacitor.

### 2.1 O GRÃO DE SOJA

A soja é uma planta de origem asiática, pertencente à família das leguminosas (OLIVEIRA, 2005; CANÇADO, 2004). Sua cultura intensificou-se em muitos países em virtude da grande riqueza em albuminas e óleos que encerra em suas sementes. Trata-se de uma cultura de grande importância econômica, não só para o mercado interno, mas também para o externo, constituindo-se numa grande fonte de divisas para o Brasil.

Alguns historiadores relatam que a soja chegou ao Brasil em 1882, já outros em 1892, e outros ainda apontam que o grão chegou com os primeiros imigrantes japoneses em 1908. Porém, a expansão da soja no Brasil aconteceu nos anos 70, com o interesse crescente da indústria de óleo e a demanda do mercado internacional. No início o plantio estava concentrado nos estados do sul do país, aproveitando a entressafra da cultura do trigo. Até 1975, toda a produção brasileira de soja era realizada com cultivares e técnicas importadas dos Estados Unidos, onde as condições climáticas e os solos são diferentes do Brasil. A soja viabilizou a implantação de indústrias de óleo, fomentou o mercado de sementes e proporcionou estabilidade à exploração econômica das terras onde antes só existiam matas e cerrados (CANÇADO, 2004).

O grão da soja dá origem a produtos e subprodutos utilizados atualmente pela agroindústria de alimentos e indústria química. A proteína de soja dá origem a produtos comestíveis (ingredientes de padaria, massas, produtos de carne, cereais,



misturas preparadas, bebidas, alimentação para bebês, confecções e alimentos dietéticos). O grão de soja é utilizado também na indústria de adesivos, nutrientes, alimentação animal, adubos, formulador de espumas, fabricação de fibra, revestimento, papel e emulsão de água para tintas. A soja integral é empregada pela indústria de alimentos em geral e o óleo cru se transforma em óleo refinado e lecitina, que dá origem a inúmeros outros produtos.

### **2.1.1 Estrutura do Grão de Soja**

Para o estudo de secagem do grão de soja deve ser pré-requisito uma noção sobre a estrutura e propriedade física do grão. Por exemplo, para umedecer ou secar o grão, o fluxo de água, necessariamente deve passar pelas várias camadas dos diferentes tecidos celulares que o formam. Isto significa que, dependendo da composição química dessas camadas, o produto pode apresentar diferentes características quanto ao equilíbrio higroscópico com o ambiente onde estiver armazenado. Sua classificação biológica, como cultivar, é a seguinte: Família: *Leguminosae*; Gênero: *Glycine*; Sub-Família das Papilionáceas, tribo das Faseoláceas, ramo das fanerógamas, divisão das angiospermas, classe das dicotiledôneas, ordem das rosales; Espécie: *Glycine Max (L) Merrill*. (CANÇADO, 2004; BOERI, 2007). As sementes lisas, ovóides, globosas ou elípticas, possuem hilo quase sempre castanho, mas cuja coloração difere de acordo com a variedade. Há sementes brancas, amarelas, escuras, negras, vermelhas, vermelho-escuras, verde, verde-amarelado ou matizadas (GOMES, 1986). O diâmetro varia entre 3 e 7 mm.



**Figura 2.1 - Grãos de Soja.**

A semente de soja, ao contrário do que ocorre com as sementes das outras leguminosas, não possui amido ou o possui em pouca quantidade, sendo, porém muito rica em substâncias protéicas e graxas (MATTOS, 1987), conforme mostra a tabela 2.1.

**TABELA 2.1- COMPOSIÇÃO MÉDIA DA SOJA (Base seca)**

<b>Componente</b>	<b>Percentual</b>
Umidade	11
Proteínas	38
Lipídios	19
Carboidratos	23
Açúcares e Fibras	4
Cinzas	5

Fonte: KAWAGA, 1995, *apud* EMBRAPA.

O grão de soja (figura 2.1) possui uma grande quantidade de gordura e um alto valor protéico. A gordura da soja é aproveitada industrialmente, para a produção de óleo comestível e margarinas. A pasta da soja é aproveitada para farinhas e farelos, utilizados na ração animais e, em percentual bem menor, para alimentação humana. A casca do grão de soja é um resíduo obtido no processamento de extração do óleo do grão dessa oleaginosa, de alto valor nutricional. A cada tonelada de soja que entra para ser processada, cerca de 2% é transformado em

casquinha de soja, essa porcentagem pode variar de 0% a 3%, de acordo com os objetivos de produção de farelo de soja (SILVA *et. al.*, 2004).

O processo de secagem dos grãos ainda deve ser feito sem agressões, mecânicas ou térmicas. O rompimento da película externa da semente provoca aumento na taxa de ganho ou perda de água. Tal película é importante para a proteção do grão contra o ataque de micro-organismos.

### **2.1.2 Teor de Umidade**

A umidade no grão é a quantidade de moléculas de água que se encontra ligada às diversas partes dele. O teor de umidade que pode ser removido é chamado de teor de água livre.

A relação percentual existente entre a massa de água presente no grão e sua massa total corresponde ao teor de umidade. Segundo Boeri (2007), no Brasil, o teor de água ideal para realizar a armazenagem dos grãos é de 13% base seca, evitando o desenvolvimento de fungos e bactérias.

O conceito de conteúdo de umidade tem origem no fato de os grãos serem constituídos de substâncias sólidas e de certa quantidade de água que pode ser retirada sob várias formas. Para a operação de secagem, considera-se que o grão é formado apenas por matéria seca e água. Assim, o conteúdo, teor ou grau de umidade é a quantidade relativa de água, em estado líquido que está em contato direto com a estrutura celular que é facilmente evaporada na presença de calor.

O grão de soja tem o teor de umidade entre 16 e 18,5% (base seca) e pode ser armazenado com segurança por período de 3 a 18 meses se ocorrer à redução da temperatura do grão para valores entre 3 e 10°C. O desenvolvimento de fungos e insetos e as perdas de germinação das sementes são inibidos nesta faixa de temperatura. Existe uma tendência de expansão do uso de resfriamento para grãos armazenados, mas que não irá substituir a secagem. Juntamente com a secagem, o resfriamento irá permitir maior tempo de espera antes da secagem em condições seguras de armazenagem neste período. Assim, a prática de resfriamento dos grãos possibilita a preservação da qualidade, eliminando a necessidade da rápida secagem dos grãos, com umidade entre 16 e 18%, limitando o desenvolvimento microbiológico e de insetos, e permitindo um maior tempo de armazenamento sem o uso de tratamentos com produtos químicos. Os conteúdos de umidade nos quais ocorre um aumento expressivo na taxa respiratória estão próximos daqueles nos quais o aquecimento e a deterioração se inicia no armazenamento. O teor de

umidade dos grãos recomendados para armazenagem segura deverá situar-se na faixa de 10 a 13%.

O operador do secador deve estar sempre atento para que, no final do processo de secagem, o produto não perca água em excesso, trazendo problemas no manuseio, no beneficiamento e na comercialização.

### 2.1.2.1 Cálculo do Teor de Umidade

Como citado anteriormente, a quantidade de água contida nos grãos é designada baseando-se no peso da água e geralmente é expressa em porcentagem.

Existem duas maneiras de se expressar a umidade contida em um produto em base úmida ou base seca.

Umidade em base úmida ( $U_{bu}$ ) (%) é a razão entre a massa de água do produto e a sua massa total. Esta base é utilizada em designações comerciais, armazenamento. A seguir, é apresentada a relação matemática para determinação da umidade dos grãos em base úmida:

$$U_{bu} = \frac{m_a}{m_t} \times 100 = \frac{m_a}{m_a + m_s} \times 100 \quad (2.1)$$

onde:

$m_a$  = massa da água;

$m_s$  = massa da matéria seca;

$m_t$  = massa total.

O teor de umidade do grão é geralmente expresso em função de sua massa de matéria seca, já que esta permanece constante durante todo o processo de secagem, ao contrário do volume do grão úmido, que pode variar e o qual não é indicado para expressar o teor de umidade. Umidade em base seca ( $U_{bs}$ ) (%) é razão entre a massa de água produto e a massa de matéria seca. Esta base é utilizada em trabalhos de pesquisa, equações de secagem. A equação 2.2 mostra a relação matemática para determinação da umidade dos grãos em base seca:

$$U_{bs} = \frac{m_a}{m_s} \times 100 \quad (2.2)$$

A determinação da umidade dos grãos (deterioráveis) pelo método da estufa é baseada na secagem de uma massa conhecida de grãos, calculando-se o teor de umidade mensurando a massa de água perdida no processo.

O teor de umidade expresso em base seca é numericamente maior do que o teor de umidade da base úmida. Na equação 2.2, com apenas a massa da matéria seca, o denominador é menor do que na primeira equação 2.1, em que ele representa a massa total do grão e em ambos os casos, o numerador pertence constantemente, ou seja, representa a massa de água.

### **2.1.3 Métodos de Medição do Teor de Umidade.**

Existem diferentes métodos para se proceder a medição do teor de umidade de sementes ou grãos que podem ser classificados em métodos diretos e indiretos (SILVA, 2009).

#### **2.1.3.1 Métodos Diretos**

Nos métodos diretos a massa de água extraída do produto é relacionada com a massa de matéria seca (teor de umidade, base seca), ou com a massa total do material original (teor de umidade, base úmida), geralmente por processo de aquecimento, e o teor de umidade é calculado pela diferença de peso das amostras no início e no final do processo.

Devido a sua maior confiabilidade, os métodos diretos são empregados como padrão para a aferição de outros procedimentos. Por exigir um tempo relativamente longo para sua execução, às vezes representa uma desvantagem do método como, por exemplo, quando se necessita de resposta imediata no controle de uma determinada operação (PARK *et al.*, 2006).

Os métodos diretos são: estufa, infravermelho e destilação.

#### **2.1.3.2 Métodos Indiretos**

Nestes métodos o teor de umidade é estimado em função das propriedades elétricas do produto em uma determinada condição. Os dois princípios empregados são o da resistência elétrica (condutividade) e o da medida da constante dielétrica (capacitância) (PARK *et al.*, 2007).

Ditos como métodos práticos e rápidos na determinação do teor de umidade, os determinadores elétricos ou eletrônicos são utilizados no controle de secagem, da armazenagem e em transações comerciais. Estes equipamentos

fornece o valor do teor de umidade em base úmida, ou seja, mostra a relação percentual entre a quantidade de água e a massa total da amostra, de acordo com a equação 2.1.

#### **2.1.4 Secagem da Soja**

A produção de grãos e sementes com elevada qualidade requer que o produto seja colhido sadio, visando minimizar as perdas ocasionadas no campo pelo ataque de insetos, doenças e microorganismos. A colheita do grão ocorre com o seu teor de umidade elevado, o que faz do procedimento de secagem uma das operações de primordial importância entre as técnicas envolvidas na conservação das qualidades desejáveis de produtos de origem vegetal (BOERI, 2007).

Os produtos granulares recém-colhidos do campo apresentam, em geral, um teor de umidade inadequado para a armazenagem segura, necessitando, portanto, de serem submetidos a um processo de secagem. A escolha de um equipamento de secagem e condições operacionais adequadas é de fundamental importância para preservação das qualidades físicas e fisiológicas das sementes (LIRA, 2005).

O uso final de um produto depende da qualidade que deverá ser conservada. Assim, o critério de conservação da qualidade é que dita o processo de secagem.

A secagem de sólidos é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nos mais diversos processos usados em indústrias agrícolas, cerâmicas, químicas, alimentícias, farmacêuticas, de papel e celulose, mineral e de polímeros.

A secagem é a separação parcial entre a matéria sólida e água contida no grão. É um processo que usa o ar como meio para conduzir o calor e receber o excesso de água dos grãos. Ela se baseia no fato de que o aumento de temperatura do ar diminui a sua umidade relativa e possibilita a absorção da umidade disponível no grão. Segundo Boeri (2007), o teor de umidade dos grãos acompanhará a diminuição de umidade do ar quando os submetemos a uma corrente de ar quente. Assim, na secagem ocorre uma perda de massa, que é o resultado da evaporação de parte da água existente no grão. O calor fornecido aos grãos possibilita a migração da água à superfície, carregada através do fluxo de ar que flui pelos grãos. Portanto, o ar de secagem deve possuir uma quantidade de calor a ceder aos

grãos, possuindo assim condições de reter e transportar uma quantidade de massa de água na forma de vapor.

Industrialmente a desidratação é definida como secagem (retirada de água) pelo calor produzido artificialmente sob condições de temperatura, umidade e corrente de ar cuidadosamente controlada. Dessecação tem, em essência, o mesmo significado de desidratação, sendo mais genérico e às vezes usado para se referir a produtos da secagem ao sol. Tanto a desidratação quanto a secagem refere-se a um sistema qualquer de remoção de água por intermédio de um processo que, em geral, segue regras bastante simples. Em resumo, o aumento da temperatura do produto a ser desidratado força a evaporação da água, enquanto a circulação do ar remove a umidade evaporada.

Um crescente interesse entre os trabalhadores da indústria alimentícia tem sido a medida das propriedades físicas dos frutos e produtos, sendo assim um evento crítico.

A secagem é um processo fundamental da tecnologia para a produção de sementes ou grãos de alta qualidade. Além de preservar as sementes ou grãos de alterações físicas e químicas induzidas pelo excesso de umidade, torna possível a manutenção da qualidade inicial durante o armazenamento. No entanto, o baixo teor de umidade diminui a atividade físico-química do produto e inibe as atividades microbianas associadas.

Os fatores que afetam a secagem estão relacionados à área superficial, ou seja, quanto maior a razão entre a área superficial do grão e seu volume, mais rapidamente se dará a secagem, pois maior é a área que entra em contato com o ar.

A secagem inadequada, ou sua ausência, é uma causa da deterioração qualitativa dos grãos durante o armazenamento.

### **2.1.5 Curva de Secagem**

A operação de secagem deve ser realizada com extremo cuidado, pois esta prática pode reduzir sensivelmente a qualidade dos grãos e sementes, os quais irão passar por outras etapas do processamento. Os principais parâmetros de secagem que podem estar associados à redução da qualidade dos grãos e sementes são: a temperatura, umidade relativa, velocidade do ar de secagem, taxa do produto, teor e umidade inicial e final do produto, sistema de secagem empregado e o tempo de

residência do produto na câmara de secagem. Por outro lado, uma “super-secagem” torna os grãos quebradiços, além de elevar o custo de secagem (TEIXEIRA, 2001).

A secagem é um processo preventivo e consiste em retirar a parte de água do grão, para evitar a ação de microorganismos, insetos e diminuir a intensidade do processo natural de desenvolvimento e/ou deterioração do grão durante o período de armazenamento, durante o qual, se for por um período longo, pode ocorrer perda de matéria orgânica pela respiração dos grãos (PUZZI, 1977).

### **2.1.6 Secador**

Os tipos de secadores variam de acordo com suas características, principalmente quanto à mobilidade: ao sistema de carga, à ventilação, ao fluxo de ar, à torre de secagem, ao sistema de descarga, ao combustível, ao ar da fornalha e o grau da fornalha (BORGES, 2002).

O secador mais utilizado comercialmente para secagem de soja é o secador tipo fluxo misto em torre, tanto pela faixa de capacidade em que opera, quanto pelas suas características técnicas. São secadores verticais, estáticos, que operam de forma intermitente ou contínua, com os grãos em movimento, com insuflação de ar, fluxo de ar misto, calhas paralelas, descarga de bandejas mecânicas, ar de fornalha direto, secagem de controle automático e combustível sólido ou gasoso.

Nos secadores do tipo fluxo misto em torre, a forma construtiva permite trabalhar com maior percentual de impurezas, com mínimo risco de incêndio, além de permitir a secagem das impurezas como vagens, meio-grãos e outros, juntamente com os grãos sadios, e separá-los após a secagem, aproveitando-os para a fabricação de rações de bovinos ou outras utilidades (DUARTE, 2010).





**Figura 2.2- Secador Tipo Fluxo Misto em Torre.**

Os secadores do tipo fluxo misto em torre (figura 2.2) são estruturas de metal ou alvenaria, instaladas ao lado de uma unidade receptora (moega) e de um armazém graneleiro. De modo geral, o complexo todo é composto por um sistema de aquecimento do ar (fornalha), um sistema de circulação de ar (ventilador e dutos), sistema de transporte de grãos (elevadores) e um sistema de secagem e resfriamento (torre).

A capacidade do secador do tipo fluxo misto em torre é de 40 a 400 toneladas por hora (DUARTE, 2010).

Os secadores do tipo fluxo misto em torre atuais utilizam basicamente os mesmos princípios dos da década de 60, operando pelo sistema intermitente ou contínuo. Trabalham por aspiração e secam qualquer tipo de sementes e de grãos

O principal componente é a torre, dividida em duas zonas. Na parte superior, a zona por onde o ar entra aquecido, também é chamada de câmara de

secagem. A segunda zona, na parte inferior, é a zona de resfriamento da massa de grãos (figura 2.3).

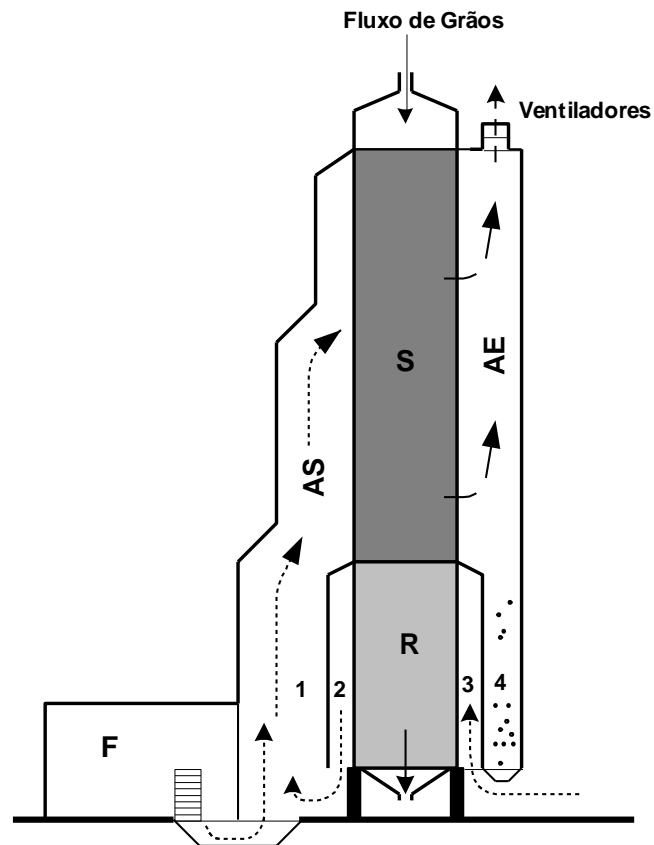


Figura 2.3 - Esquema de fluxos para secagem contínua, com resfriamento.

Fonte: SILVA, 2006.

Legenda da imagem:

F= fornalha;

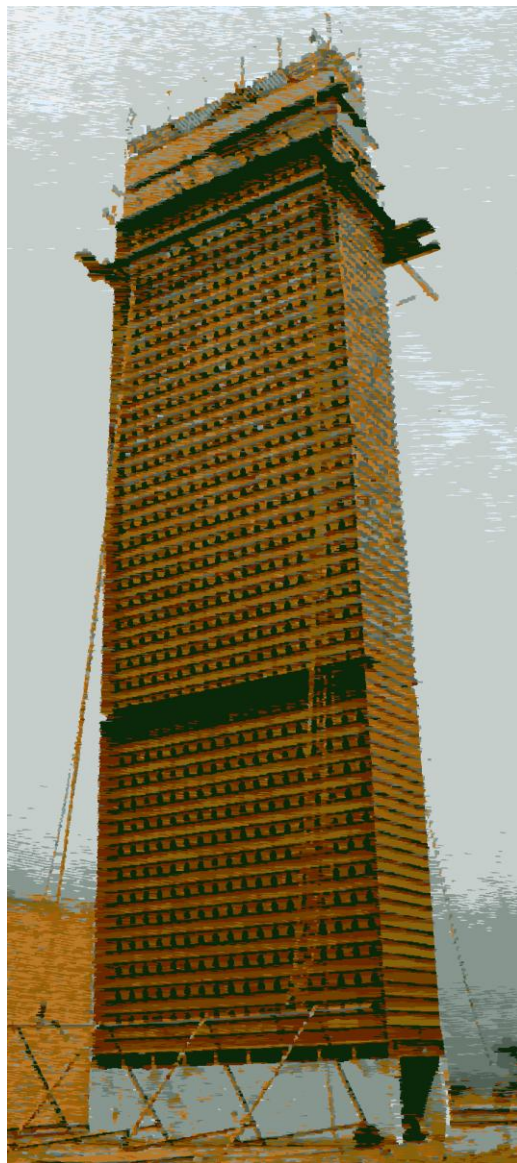
AS= ar de secagem;

S= câmara de secagem;

R= câmara de arrefecimento;

AE= ar exausto.

Espelhos e dutos ou calhas (figura 2.4 e 2.5) são dispositivos montados que permitem a entrada do ar, sendo os do lado da fornalha abertos e do lado do ventilador fechados (PARK *et al*, 2007). Neste momento é que se dá a troca de calor do ar com a massa de grãos e a umidade do grão com o ar. Na câmara de resfriamento, os grãos trocam calor com o ar, resfriando-se.



**Figura 2.4: Torre de Secagem montada.**

Fonte: PARK *et al*, 2007



**Figura 2.5 - Imagem do interior do Secador do Tipo Fluxo Misto em Torre**

O produto (neste caso os grãos) é colocado na parte superior pelos elevadores e cai por gravidade, passando pelas calhas horizontais da torre. O controle do fluxo dos grãos é feito com o fechamento/abertura da mesa de descarga. O ar aquecido na fornalha é misturado com o ar ambiente e conduzido pela lateral da torre até a entrada das calhas. As calhas de entrada de ar são fechadas no outro lado, obrigando o ar a sair por baixo e passar pela massa de grãos. Como esse ar tem baixo teor de umidade e temperatura em torno de  $90^{\circ}\text{C}$ , bem maior que a dos grãos que estão à temperatura ambiente, ocorre o aquecimento dos grãos e a conseqüente vaporização da água presente nestes. Com a migração de água dos grãos para o ar, ocorre o processo de secagem do produto. O ar úmido é recolhido pelas calhas de saída, conduzido para o difusor de saída de ar e retirado da torre por um escoamento de ar forçado por um exaustor localizado na parte superior do secador ou por um ventilador colocado na parte inferior. Depois de passar pela câmara de secagem (parte superior,  $2/3$  da torre), o produto passa pela câmara de arrefecimento (parte inferior  $1/3$  da torre), na qual é submetida a um fluxo de ar com temperatura ambiente (SILVA, 2005).

O esquema de fluxos de ar depende do sistema de secagem utilizado.

Comparando as direções e sentidos dos fluxos dos grãos e do ar, pode identificar quatro tipos de fluxo: corrente, contracorrente, cruzado e mista. (figura 2.6)

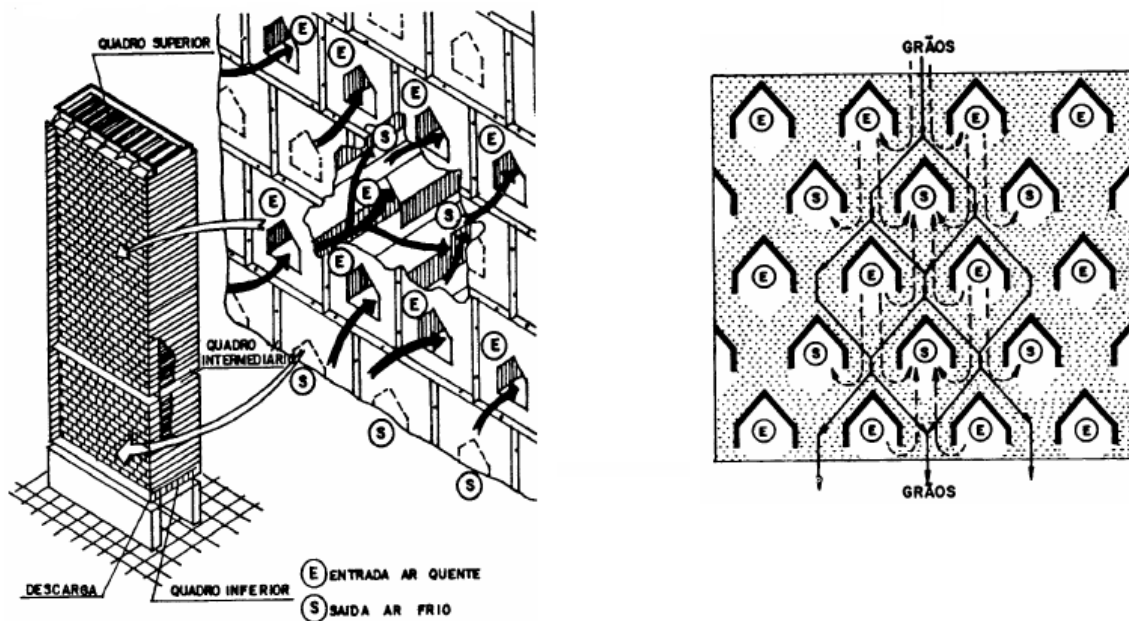


Figura 2.6- Esquema da movimentação do ar e do grão de soja.

Fonte: PARK *et al*, 2007

Os secadores do tipo fluxo misto em torre apresentam todos os tipos de fluxos entre as calhas de entrada e saída na torre de secagem.

A figura 2.6 mostra esquematicamente um corte transversal onde podem ser observadas as calhas de entrada e saída de ar, assim como a trajetória sinuosa dos grãos ao descer pela torre e passar entre as calhas. Nas regiões imediatamente abaixo das calhas ocorre o fluxo cruzado. No corte longitudinal pode-se observar os fluxos do ar, corrente e contracorrente. Foi considerado um estágio, o espaço entre uma calha de entrada e uma de saída de ar.

Os secadores do tipo fluxo misto em torre apresentam todos os tipos de fluxos entre as calhas de entrada e saída na torre de secagem. Em geral, as zonas de fluxo cruzado são relativamente pequenas comparadas as de fluxo concorrente e contracorrente, apesar de que esta relação depende do espaçamento entre as calhas nas direções horizontal e vertical (BORGES, 2002).

Como foi descrito anteriormente, este sistema de secagem permite quatro possibilidades de utilização: a secagem contínua, a secagem intermitente, a secagem do corpo inteiro e a secagem em lotes.

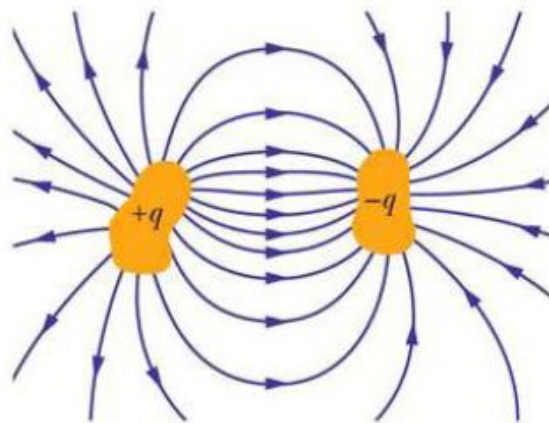
Os procedimentos, para utilização da torre, são de fundamental importância para se obter a maior eficiência na operação, uma vez que se trata de um volume de grãos muito elevado. Os fabricantes justificam como uma das principais vantagens deste sistema, o fato dele proporcionar uma umidade de saída dos grãos praticamente constante. Nas indústrias de óleo, o sistema oferece grãos com melhor qualidade, aumentando o rendimento do solvente na extração. A secagem é efetuada a mínimo custo, pois os grãos não secam acima do necessário.

## 2.2 CAPACITÂNCIA

### 2.2.1 Capacitores

O capacitor é um dispositivo elétrico que tem a capacidade de armazenar energia em um campo elétrico, através do acúmulo do desequilíbrio interno de carga elétrica. Os formatos típicos consistem de duas placas ou eletrodos que armazenam cargas elétricas de sinais opostos. Estas duas placas são constituídas de materiais condutores e separadas por um material isolante (dielétrico). As cargas elétricas armazenadas na superfície das placas ficam limitadas pelo dielétrico.

Segundo Sears *et al*, 1984 dois condutores quaisquer, numa grande variedade de tamanhos e formas, separados por um isolante, formam um capacitor (ou condensador). Quando um capacitor está carregado, os condutores possuem cargas de iguais valores e sinais opostos,  $+q$  e  $-q$ , de modo que a carga resultante no capacitor como um todo seja nula.



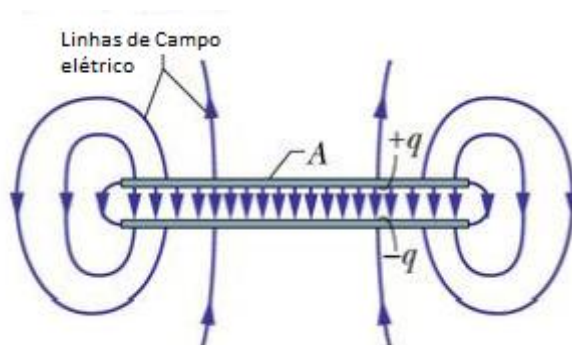
**Figura 2.7 - Dois condutores, isolados com formato qualquer, separado por um material isolante (no caso o ar).**

Fonte: HALLIDAY *et al* (1996).

A capacitância ou capacidade ( $C$ ) de um capacitor é definida como a razão entre a carga  $Q$  dos condutores e a diferença de potencial ou tensão ( $V$ ). O campo elétrico na região entre os condutores é proporcional a esta carga, assim define-se que

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.3)$$

O campo elétrico entre às placas do capacitor é uniforme na sua região central, e não-uniforme nas bordas. Nas bordas as linhas de campo apresentam uma deformação para fora das placas, conhecida como efeito de borda. Na maioria das aplicações práticas esse efeito é ignorado.



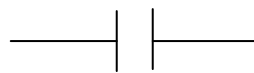
**Figura 2.8 - Mostram as linhas de campo elétrico.**

Fonte: HALLIDAY *et al* (1996).

A unidade SI de capacitância é *coulomb por volt* ( $C.V^{-1}$ ). A capacitância de 1 coulomb por volt é chamada 1 *farad* (1F), em homenagem a Michael Faraday (HALLIDAY *et al.*, 1996).

$$1 \text{ farad} = 1 \text{ F} = 1 \text{ coulomb por volt} \\ = 1 \text{ C/V}$$

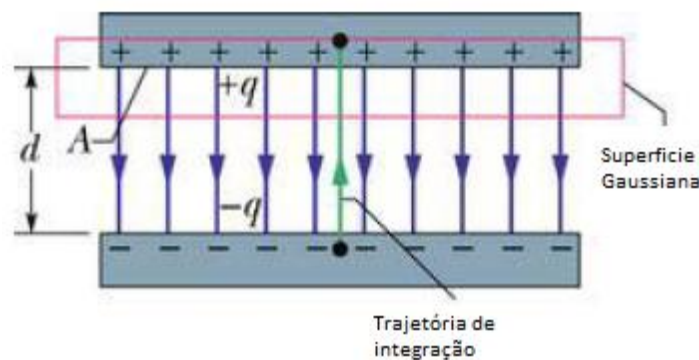
Representação um capacitor é dada pelo símbolo:



Uma vez que as placas são condutoras, elas constituem superfícies equipotenciais: todos os pontos sobre uma placa têm o mesmo potencial elétrico. Além disso, existe uma diferença de potencial entre as duas placas. Representamos o valor absoluto da diferença de potencial por  $V$  e não por  $\Delta V$  (HALLIDAY *et al.*, 1996).

### 2.2.2 Capacitor de Placas Paralelas.

O capacitor de placas paralelas é construído, normalmente, de duas placas planas e paralelas de iguais dimensões, feitas de um material condutor e separadas por uma distância ( $d$ ) que é infinitamente menor comparada às dimensões das placas. A figura 2.9 ilustra um capacitor de placas paralelas típico.



**Figura 2.9 - Capacitor de Placas Paralelas carregado.**

Fonte: HALLIDAY *et al* (1996).



Uma superfície gaussiana envolve a carga sobre a placa positiva. Se as placas estiverem suficientemente próximas, o efeito de borda pode ser desprezado, o campo entre elas será uniforme e as cargas das placas serão uniformemente distribuídas sobre as faces que se defrontam.

A capacitância de um capacitor de placas paralelas é determinada pela seguinte relação

$$C = \epsilon_r \cdot \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (2.4)$$

onde:

A = área da placa (m<sup>2</sup>);

d = distância entre as placas (mm);

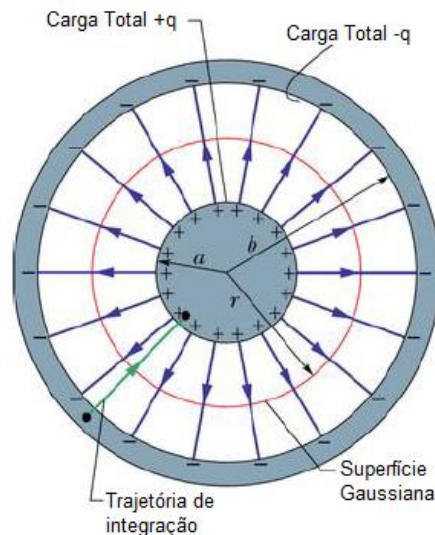
$\epsilon_0$  = constante de permissividade do vácuo (8,85 X 10<sup>-12</sup> F/m);

$\epsilon_r$  = constante dielétrica ou permissividade relativa do material entre as placas (pF/m).

Verifica-se que a capacitância depende da constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ) e dos fatores geométricos, isto é, da área (A), da distância (d) entre as placas. Nota-se que a capacitância é diretamente proporcional a área e inversamente proporcional a distância entre os planos. Portanto, quanto maior a área, mais cargas o capacitor pode acumular, o que aumenta a capacitância. Logo, quanto menor a distância entre os planos, menor é a diferença de potencial entre eles, o que também aumenta a capacitância (MACHADO, 1987).

### 2.2.3 Capacitor Cilíndrico.

Conforme a definição de capacitância, as placas dos capacitores podem variar na sua forma geométrica. Porém, a mudança da forma geométrica do capacitor altera a relação matemática que determina a sua capacitância em função do formato geométrico de suas placas. Outro formato típico de capacitor é o capacitor de cilindros coaxiais. Este dispositivo é formado por duas placas com formato cilíndrico, com raios diferentes, de comprimentos iguais e posicionados no mesmo eixo.



**Figura 2.10 - Um corte transversal de um capacitor cilíndrico de comprimento  $L$ , mostrando uma superfície gaussiana cilíndrica e a trajetória radial de integração.**

Fonte: HALLIDAY *et al* (1996).

Na figura 2.10, num corte transversal, um capacitor cilíndrico de comprimento  $L$ , formado por dois cilindros coaxiais de raios  $a$  e  $b$ . Supomos que  $L > b$ , de modo que podemos desprezar o efeito de borda do campo elétrico que ocorre nas extremidades dos cilindros. Cada placa contém uma carga de intensidade  $q$  (HALLIDAY *et al.*, 1996).

A capacitância de um capacitor cilíndrico é:

$$C = 2\pi\epsilon_r\epsilon_o \frac{L}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (2.4)$$

onde :

$C$  = capacitância (F);

$\epsilon_o$  = constante de permissividade do vácuo, na qual é  $8,85 \times 10^{-12}$  F/m;

$\epsilon_r$  = constante dielétrica ou permissividade relativa do material entre as placas (pF/m);

$L$  = comprimento (mm);

$a$  = raio do cilindro menor (mm);

$b$  = raio do cilindro maior (mm).

Verifica-se que a capacitância do capacitor de cilíndricos coaxiais varia com constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ), com o comprimento (L) e com a relação do raio maior com o raio menor dos cilindros. Por sua vez, a umidade da soja influencia a constante dielétrica do capacitor, independente do seu formato geométrico. Assim é possível estimar a umidade dos grãos de soja a partir da variação da medida da capacitância no dispositivo capacitivo.

A seguir são apresentados os valores conhecidos da constante dielétrica de alguns materiais comumente utilizados como isolantes das placas em capacitores.

**TABELA 2.2: CONSTANTES DIELÉTRICAS DE ISOLANTES CAPACITORES (TEMPERATURA AMBIENTE)**

<b>MATERIAL</b>	<b>CONSTANTE DIELÉTRICA</b>
Ar (1 atm)	1,00054
Poliestireno	2,6
Papel	3,5
Porcelana	6,5
Cerâmica	130

Fonte: HALLIDAY *et al* (1996).

## 2.2.4 Impedância e Reatância Capacitiva

Uma forma para se determinar a capacitância de um dispositivo capacitivo é através da sua impedância elétrica, ou mais precisamente através da sua reatância capacitiva. A impedância elétrica descreve uma medida da oposição à passagem da corrente elétrica em circuitos de corrente alternada (CA). A impedância elétrica ainda pode ser definida como sendo a razão entre tensão e a corrente no domínio da frequência. Geralmente, a impedância é representada por um número complexo em que sua parte real determina a resistência elétrica e na parte imaginária representa a sua reatância (NILSSON e RIEDEL, 2003). Desta forma, na Figura 2.11 pode-se visualizar a impedância no plano complexo:

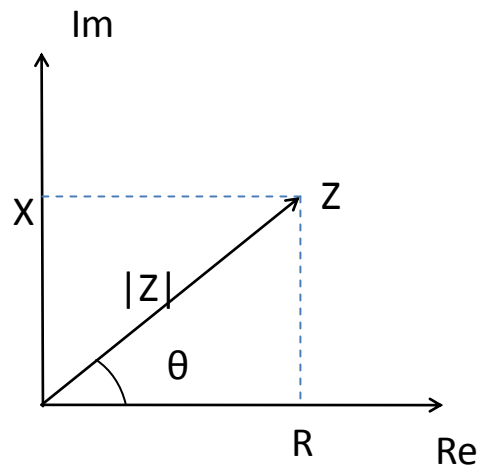


Figura 2.11: Representação da Impedância no plano complexo.

Assim, a partir da representação no plano complexo podemos determinar as seguintes relações matemáticas:

$$Z = R + jX \quad (2.5)$$

$$Z = |Z| \angle \theta \quad (2.6)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{X}{R} \right) \quad (2.8)$$

onde:

Z= impedância ( $\Omega$ );

R= resistência ( $\Omega$ );

X=reatância ( $\Omega$ );

$\Theta$  = fase da impedância Z (em graus).

Entretanto, em um dispositivo com característica puramente capacitiva, a parcela real da impedância complexa pode ser considerada nula. Assim, nesse caso particular a representação da impedância de um capacitor no plano complexo ocorre conforme a Figura 2.12.

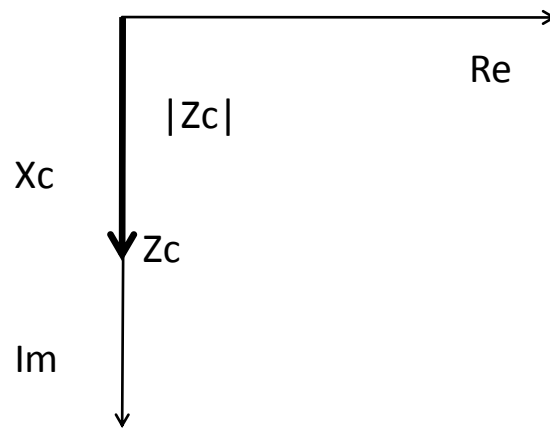


Figura 2.12: Representação da impedância para um circuito capacitivo

A relação que determina a impedância de dispositivo puramente capacitivo é conhecida e vale:

$$Z_c = \frac{-j}{\omega C} = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.9)$$

onde :

$\omega$  = frequência angular;

$C$  = capacitância.

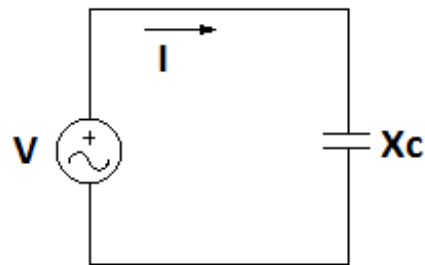
Conhecendo-se o valor da impedância do capacitor e verificando as relações na representação no plano complexo, obtêm-se a relação entre a reatância capacitiva e a impedância, conforme segue:

$$|Z_c| = \sqrt{0 + X_c^2} = X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.10)$$

Assim, verifica-se que a impedância de um capacitor varia conforme a sua própria capacitância e a frequência do sinal ( $f$ ) aplicado. Pode-se afirmar que, nesse caso, a reatância  $X_c$  é equivalente a impedância  $Z_c$ .

### 2.2.5 Medição da Capacitância

Conhecidas as relações que determinam o valor da reatância capacitiva e a partir da Lei de Ohm para correntes alternadas é possível medir capacitância através do circuito da figura 2.13.



**Figura 2.13: Circuito para medição da capacitância**

Aplicando-se uma tensão em corrente alternada conhecida e medindo-se o valor efetivo de corrente resultante no circuito, determina-se o valor da capacitância através das seguintes relações matemáticas:

$$V = Z \cdot I \quad (\text{Lei de Ohm para correntes alternadas}) \quad (2.11)$$

onde:

V= tensão (V);

Z= impedância ( $\Omega$ );

I= corrente (A).

Pelo fato da impedância do circuito ser puramente capacitiva, a equação (2.11) pode ser aproximada por:

$$V = X_c \cdot I \quad (2.12)$$

Aplicando-se (2.10) em (2.12) temos:

$$V = \frac{1}{2\pi f C} \cdot I \quad (2.13)$$

Isolando-se a variável C, que representa o valor da capacitância, da equação (2.13), obtém-se:

$$C = \frac{I}{2\pi f V} \quad (2.14)$$

Onde C é a capacitância medida, I é a corrente efetiva do circuito, V é a tensão efetiva aplicada no capacitor e f é freqüência do sinal aplicado.

Esta maneira é uma entre as diversas conhecidas para se fazer a medida da capacitância de um dispositivo eletrônico. Existem outros métodos para determinação da capacitância como, por exemplo, pelo calculo da constante de tempo de carga ou descarga do capacitor. Este método foi apresentado com o intuito de demonstrar como é possível se realizar a medida da capacitância através

de um método indireto, em que as características e formas do dispositivo não são conhecidas.

### 3 DESCRIÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO.

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados nos procedimentos e medições feitas para este trabalho. A descrição do equipamento, no qual estão listados na tabela 3.1.

TABELA 3.1 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Equipamento	Marca/Modelo	Escala	Margem de Erro	Freq.
<b>Estufa de Esterilização e Secagem</b>	Nova Ética/ 400 ND	Temp. Amb. + 15°C a 200°C	±1 °C	
<b>Balança Eletrônica</b>	BIOPRECISA/ FA2104N	(0-210) grama	±0,0005	
<b>Capacímetro Digital</b>	ICEL/ CD-300	200 pF	±0,5% + 1 dígito	800 Hz
<b>Multímetro Digital (Temperatura)</b>	MIMIPA/ ET-2650	-40°C ~ 1000 °C		
<b>Medidor de Umidade</b>	GEHAKA/ G600	Umidade % do grão	± 0,5% na umidade	
<b>Bomba de Vácuo</b>	PRISMATÉC/ 131 e 132			

Fonte: Manual dos seguintes Equipamentos.

#### 3.1 ESTUFA DE ESTERILIZAÇÃO E SECAGEM DA SÉRIE 400ND

É um equipamento de alta tecnologia que proporciona o controle de temperatura em seu interior, com controlador microprocessado de alta precisão e grande estabilidade ao longo do tempo, podendo ser utilizado continuamente, sem a preocupação com falhas nos instrumentos de controle (NOVA ÉTICA).

O controlador de temperatura sai de fábrica configurado para as condições de trabalho específicas do equipamento.





**Figura 3.1 - Estufa de Esterilização e Secagem da Série 400ND**

### 3.2 BALANÇA ELETRÔNICA – FA 2104N

É uma balança multi-função eletrônica que adota um microprocessador de chip único série MCS-51. A pesagem pode ser automaticamente calibrada, o tempo de integração pode ser ajustado e a sensibilidade pode ser selecionada como em balanças eletrônicas comuns (BIOPRECISA).



**Figura 3.2 - Balança Eletrônica - FA 2104N**

Este modelo possui 3 sistemas de pesagem para a escolha do usuário: grama, quilograma e onça-try.

**TABELA 3.2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA BALANÇA ELETRÔNICA [GEHAKA].**

<b>Fabricante</b>	BIOPRECISA
<b>Escala de Pesagem (g)</b>	0 – 210
<b>Precisão de leitura (mg)</b>	0,1
<b>Escala de tara (g)</b>	0 – 210
<b>Repetividade Desvio Padrão (g)</b>	0,0002
<b>Erro Linear (g)</b>	± 0,0005

Fonte: Manual da Balança Eletrônica FA 2104N.

### 3.3 CAPACÍMETRO DIGITAL

É um instrumento que foi desenvolvido em tecnologia de semicondutores. Permite fazer medições em escalas de 200pF a 20mF.



**Figura 3.3 - Capacímetro Digital ICCEL CD-300**

TABELA 3.3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CAPACÍMETRO DIGITAL ICEL CD-300

<b>Visor</b>	Cristal líquido (LCD), 3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> dígitos (1999) com 26 mm de altura
<b>Temperatura de operação</b>	0°C a 40°C
<b>Umidade de operação</b>	< 80% sem condensação
<b>Dimensões</b>	190X90X30 mm
<b>Exatidão</b>	± (0,5% + 1 dígito)
<b>Frequência</b>	800Hz
<b>Proteção</b>	Fusível de vidro, 20mm, 0,2A/250V
<b>Tensão Máxima na saída nos terminais do capacitômetro</b>	2,8V

Fonte: Manual do Capacitômetro Digital ICEL CD-300.

### 3.4 MULTÍMETRO DIGITAL

O multímetro digital modelo ET-2651 diferencia-se pelo display grande 4<sup>1</sup>/<sub>2</sub> digital com iluminação de fundo e pelas medidas de tensão DC/AC, corrente DC/AC, resistência, capacitância, temperatura e frequência, e pelos testes de diodo e continuidade.



Figura 3.4 - Multímetro Digital MIMIPA ET-2651

### 3.5 DESSECADOR DE VIDRO



**Figura 3.5 - Dessecador de Vidro**

É um dessecador a vácuo, confeccionado em vidro resistente, possuem placa de porcelana e tampa de vidro com luva, oliva resistente, ideal para procedimentos de vácuo.

Equipamento utilizado para guardar substância em baixo teor de umidade. É utilizado em conjunto com um agente “dessecante” que absorve a umidade no interior do equipamento, o dessecante normalmente utilizado é a sílica. Como auxiliar para o processo de secagem, é utilizada a bomba a vácuo que faz com que a pressão no interior do dessecador seja reduzida, após ser atingido à torneira é fechada e a bomba desligada.

### 3.6 MEDIDOR DE UMIDADE

O medidor de umidade digital portátil modelo G600 foi projetado para fornecer uma leitura direta e precisa da porcentagem de umidade, para uma vasta gama de produtos.



**Figura 3.6 - Medidor de Umidade Portátil G600**

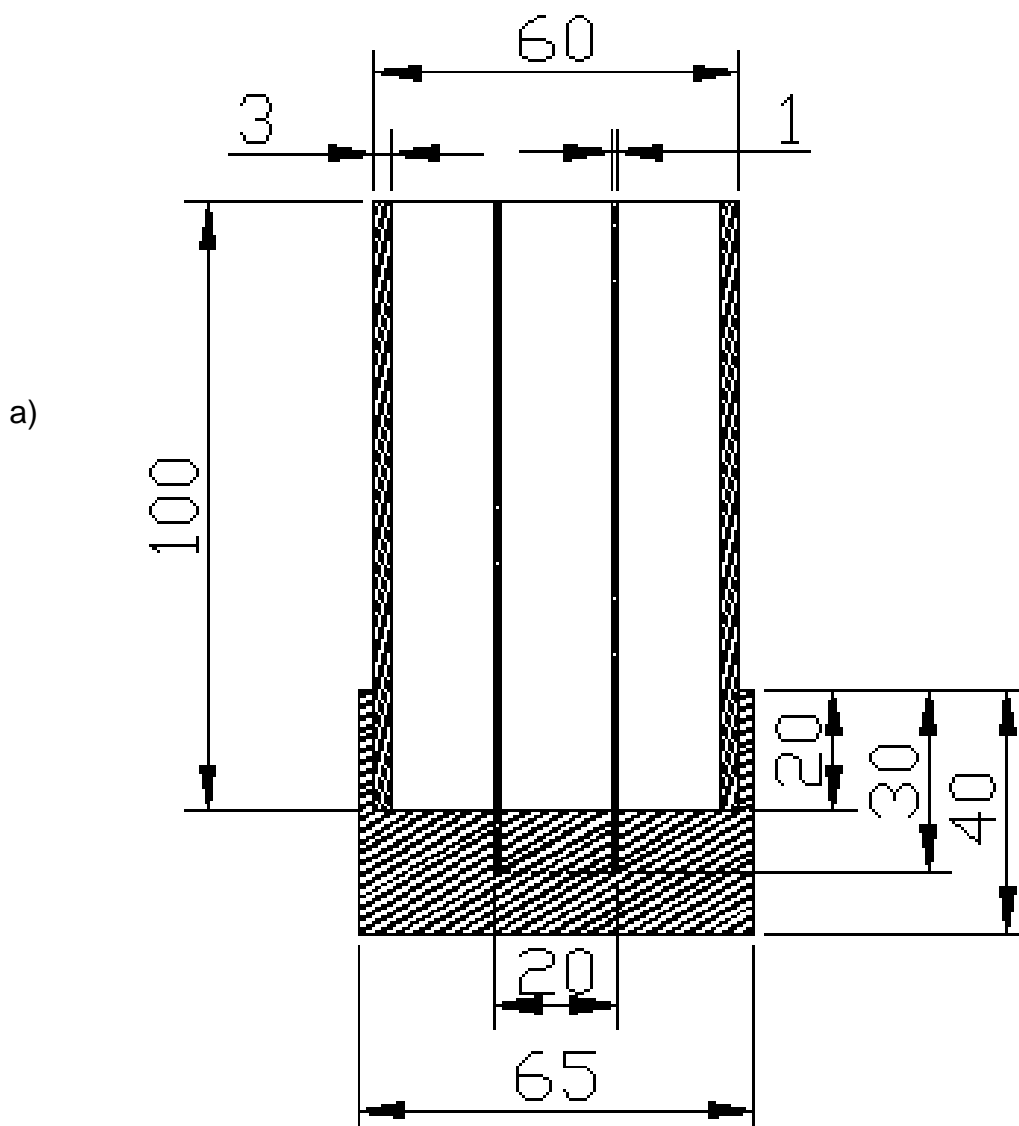
As curvas de calibração de cada cereal foram obtidas em laboratório, utilizando amostras colhidas de diversas áreas de plantio. Com a utilização do método padrão de estufa como referência foram criadas as escalas de medida de cada produto. Essas curvas foram transferidas para a memória do G600 e são facilmente identificadas pelo nome do produto. O G600 dispõe de dois instrumentos em um, gerenciado por um microprocessador interno e seu programa executa todos os cálculos necessários, resultando em leitura extremamente confiáveis e repetitivas. São esses dois instrumentos (GEHAKA):

- Um termômetro digital incorporado, que mede a temperatura da amostra;
- Um capacitômetro que indica o percentual de umidade para mais adiante sofrer as correções dos outros parâmetros.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 CAPACITOR CILÍNDRICO E CAPACITOR PARALELO COM BASE DE PROPILENO.

Em busca de melhores resultados, verificou-se que a base em madeira do capacitor cilíndrico estava influenciando nas oscilações dos resultados observados, principalmente no que diz respeito na variação de temperatura. Logo a base do capacitor foi substituída por uma base anular de 65 mm de espessura construída de polipropileno (material termoplástico), no qual o formato da base está representada na figura 4.1 e na figura 4.2. Os dois eletrodos do capacitor foram construídos de tubos de aço 1045 com 100 mm de altura. O cilindro externo tem o diâmetro interno de 60 mm e a parede com espessura de 3 mm, o cilindro interno tem o diâmetro interno de 20 mm e parede com espessura de 1 mm.



b)

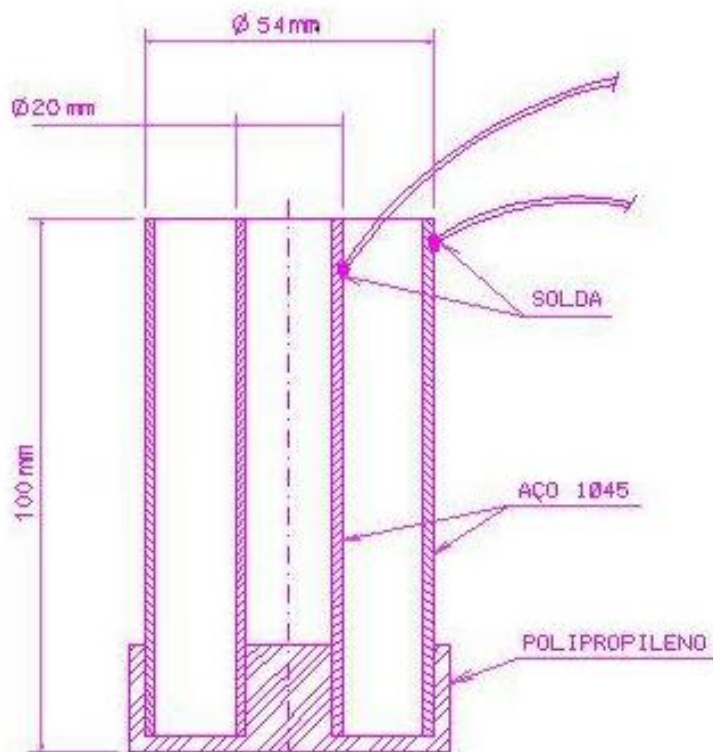


Figura 4.1 - Capacitor Cilíndrico Coaxial de Base de Polipropileno.

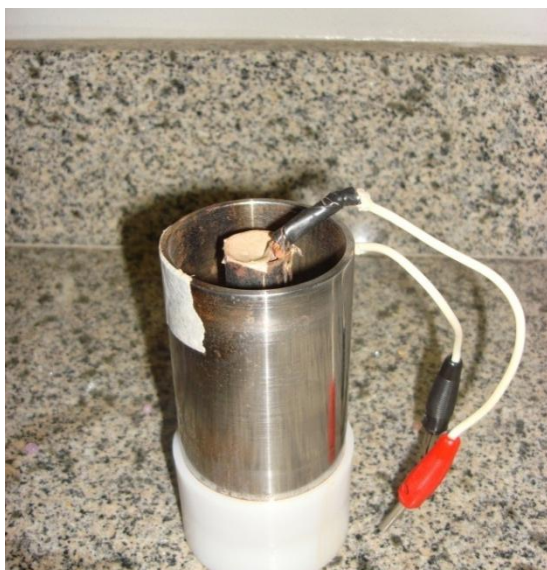
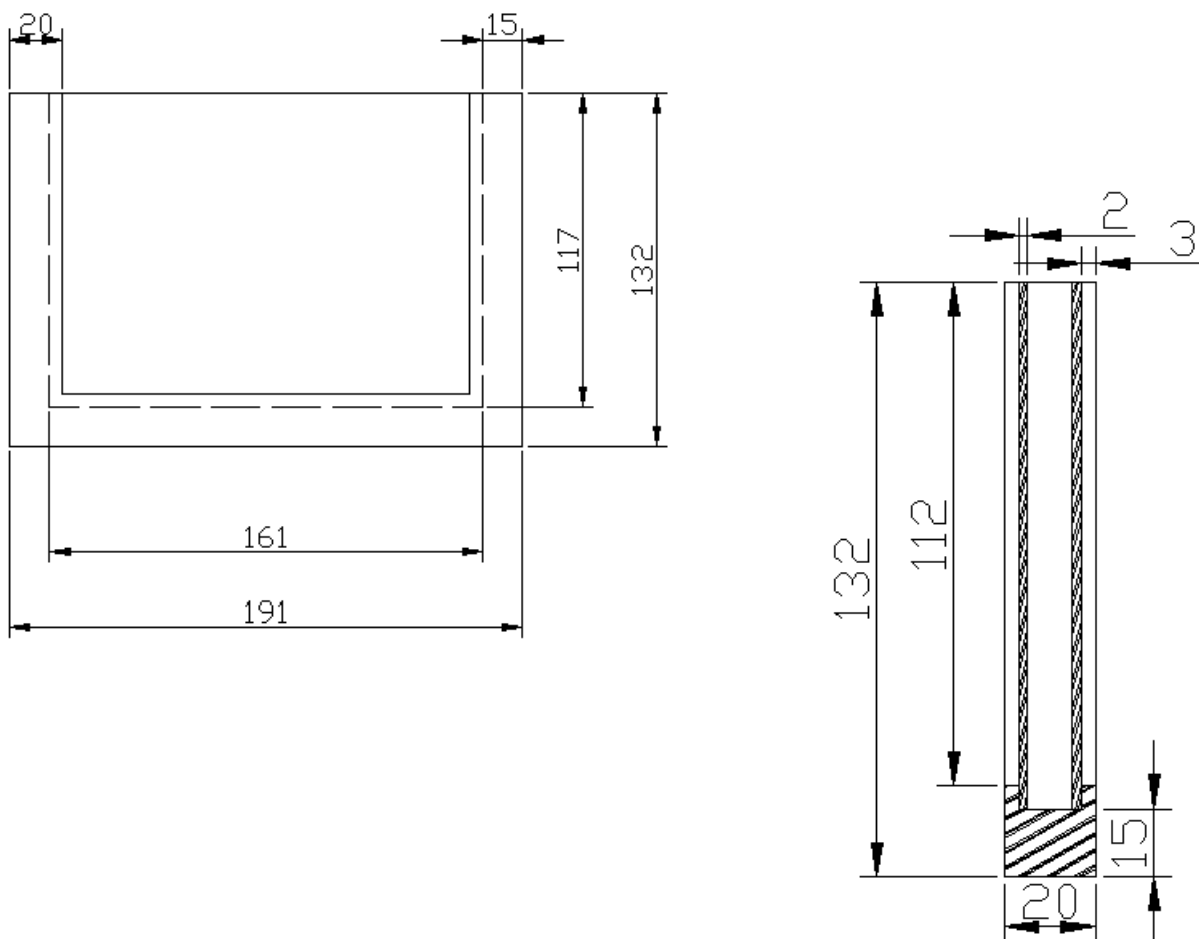


Figura 4.2 - Capacitor Cilíndrico de Base de Polipropileno.

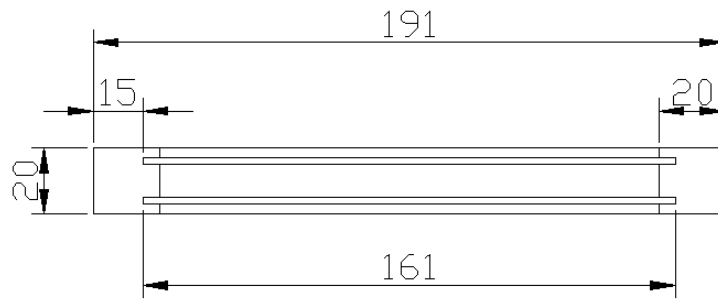
Para comparar os resultados, também foi construído um capacitor de placas paralelas. Para encontrar a distância ideal entre as placas do capacitor de placas paralelas, de modo a minimizar o efeito de borda, foi feita uma análise do desvio da

permissividade relativa medida pelo capacitor a vazio (ar). No entanto, verificou-se que na faixa entre 10 a 20 mm de distância entre as placas paralelas, a permissividade relativa do ar aproxima-se do valor esperado ( $\epsilon_r = 1$ ). O efeito de borda que pode ser atenuado diminuindo a distância entre as placas, ou seja, quanto menor for a distância entre as placas paralelas, o efeito de borda será menor podendo ser desprezível. Quanto menor a distância entre os planos, menor é a diferença de potencial entre eles, o que também aumenta a capacitância. O aumento da capacitância é uma vantagem, já que quanto maior for a capacitância do dispositivo, maior será a variação da capacitância em proporcionalmente a variação da constante dielétrica do material entre as placas do capacitor. Assim, é possível se obter uma maior resolução de medida capacitiva.

Sendo assim, foi construído um capacitor de placas paralelas de aço carbono 1045, de altura 117 mm e 161 mm de comprimento (Figura 4.3). Para manter as duas placas em paralelo, utilizou-se uma base de polipropileno (material termoplástico).





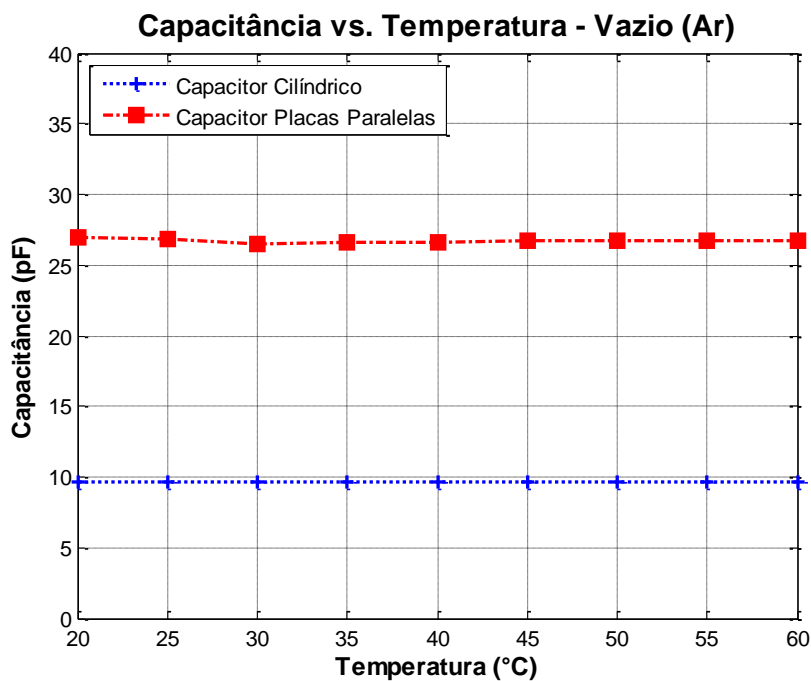


**Figura 4.3: Vista frontal, vista lateral e vista superior do Capacitor Paralelo.**



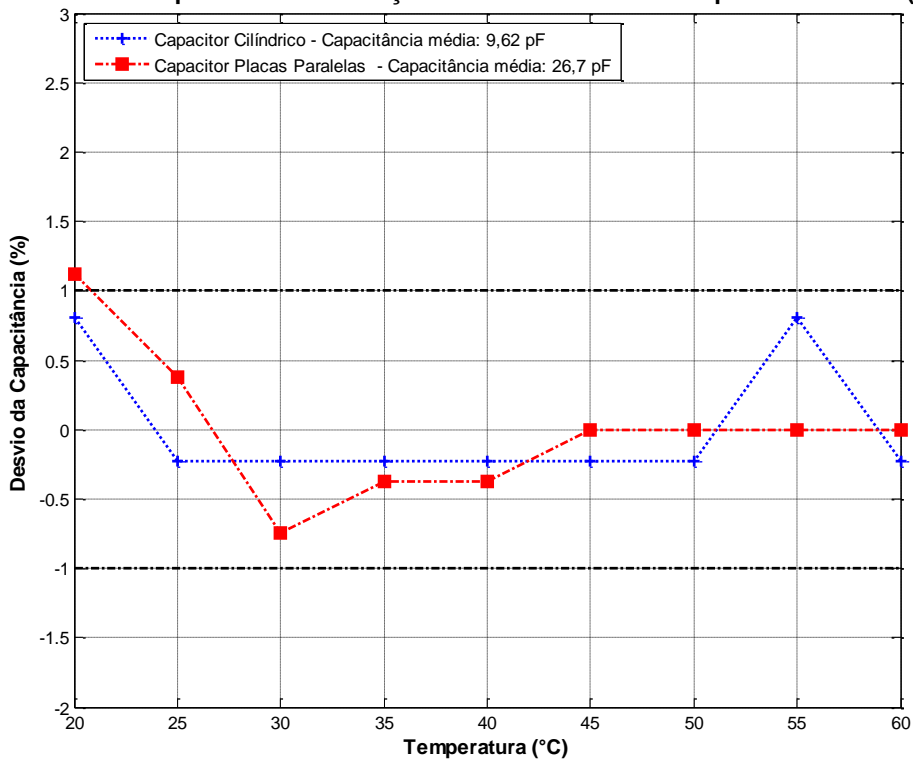
**Figura 4.4: Capacitor Paralelo**

Nos dois capacitores, foi analisada a relação da variação entre a capacitância e a temperatura dos dispositivos. Nesta análise, a temperatura considerada foi na faixa entre 20°C e 60°C. Foi feita uma medida com cada capacitor vazio (ar). O resultado obtido é mostrado na figura 4.5(a) e na figura 4.5 (b).



(a)

**Desvio da capacitância em relação ao valor médio vs. Temperatura - Vazio (Ar)**



(b)

**Figura 4.5: Relação entre a Temperatura (°C) x Capacitância (pF)**

Todas as medidas apresentaram a mesma tendência, ou seja, a variação da capacitância em relação à temperatura foi muito pequena. Observa-se na figura 4.5(b) que o capacitor de placas paralelas tem uma variação maior de capacitância

em relação à temperatura comparado ao capacitor cilíndrico. Essa variação ocorre entre -0,8 e 1,2% em relação ao valor médio. O capacitor cilíndrico teve variação entre -0,23 e 0,81%, sendo esta variação encontrada na faixa entre -1% e +1%. Estas variações podem ser consideradas desprezíveis devido à precisão dos instrumentos utilizados no experimento.

Obtendo a permissividade relativa do ar praticamente constante para ambos os capacitores, foram feitas novas medidas com objetivo de melhorar os resultados.

Assim, buscou-se um método para verificar qual a influência da temperatura da soja em relação à capacitância medida (NELSON, 1991). Desta maneira, foram utilizadas 350g de soja, para obter o gráfico da capacitância em relação temperatura. A amostra foi pesada em uma balança eletrônica para posterior análise do conteúdo de umidade pela diferença de peso. A soja foi colocada na estufa (figura 3.1) regulada em  $130\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperatura interna) por 20 minutos nas três primeiras etapas, depois por 30 minutos nas etapas quatro e cinco, por uma hora nas etapas seis e sete, e por duas horas nas seguintes até obter a base seca, pelo critério da variação do peso, sendo esta variação menor do que 1 g nas três últimas secagens. Em cada etapa a soja foi pesada no momento que em que saiu da estufa e após esfriar, para obter a variação do peso no processo de esfriamento. Ambos os capacitores foram preenchidos com a soja ainda quente. Anotou-se manualmente os valores da sua capacitância (pF) com o capacitômetro CD-300 (figura 3.3) durante todo o processo de esfriamento. A temperatura foi medida com o multímetro digital TE-2650. Os grãos foram esfriados nos capacitores e verificou-se a capacitância para cada temperatura na faixa entre  $55^{\circ}\text{C}$  e  $25^{\circ}\text{C}$ . Esse procedimento pode ser ilustrado conforme o fluxograma da figura 4.6.

Onde :

N= passos (etapas);

T= tempo (minutos)

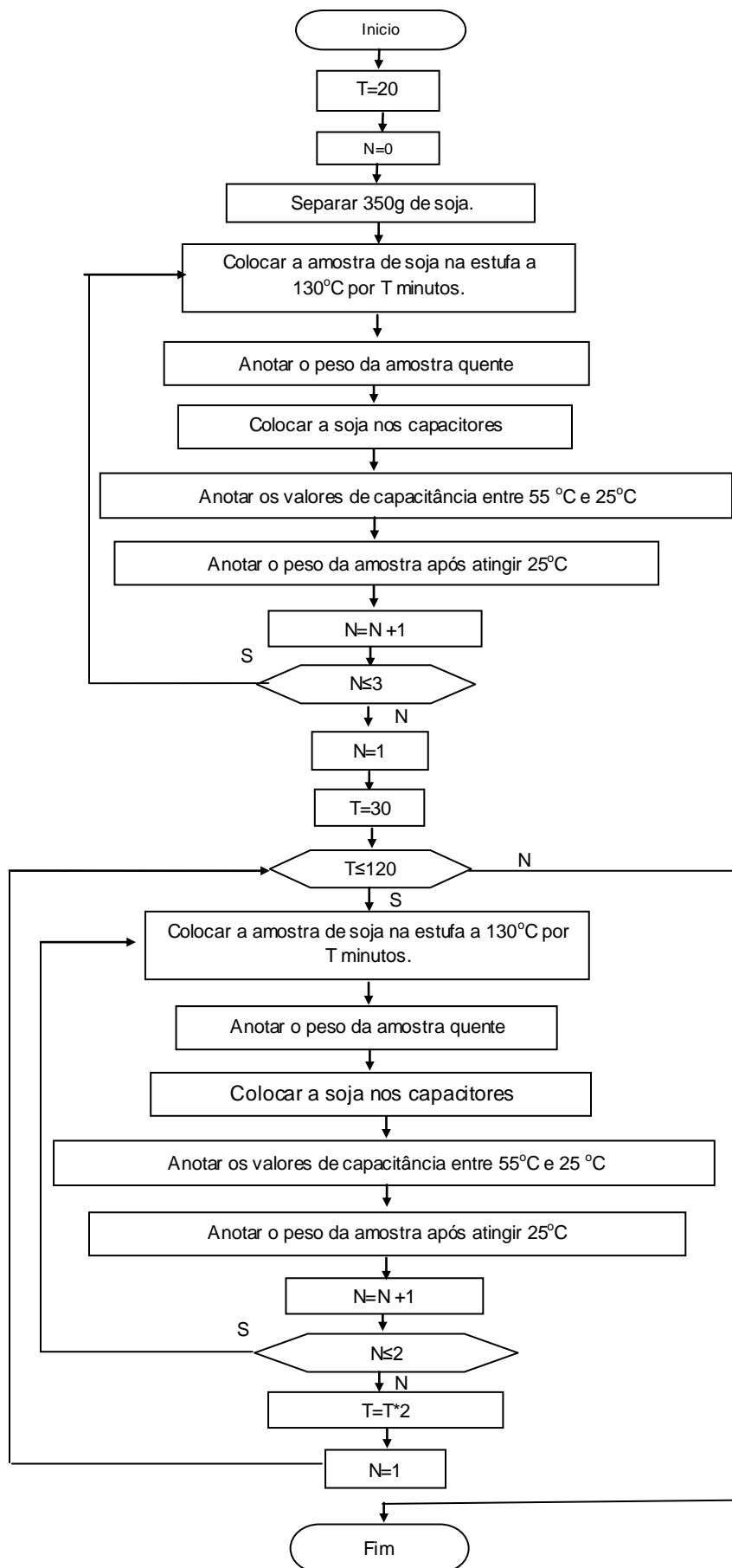


Figura 4.6 – Fluxograma do procedimento para a obtenção da relação da capacitância com a temperatura para diferentes níveis de umidade.

#### 4.1.1 Processo de Secagem

Todas as medições da propriedade dielétrica da soja foram realizadas utilizando-se sementes vindas direto do campo, de diferentes regiões como COROL Cooperativa Agroindustrial (Rodovia br 376, Apucarana – PR, 86813-240), IMCOPA (Avenida das Araucárias, 5899, Araucária - PR) e da Estância As Pedro (proprietário Suelo Agrícola S/A, distrito de Santa Fé Del Paraná – Paraguai, departamento de Alto Paraná, área total da estância é de 500 ha, área de cultivo é de 365 ha).

A análise da soja em cada amostra foi realizada em algumas etapas, como demonstra o fluxograma da figura 4.8, para obter o gráfico (figura 5.2) da capacitância em relação à umidade que demonstra a relação da capacitância em função da umidade (base seca) das amostras de soja. Foram utilizadas 350g de grãos de soja, verificando-se o peso de cada cadinho na balança eletrônica para posterior análise do conteúdo de umidade pela diferença do peso, e a capacitância resultante do capacitor cilíndrico e do capacitor de placas paralelas com a soja agindo como dielétrico. As medidas de capacitância foram repetidas por cinco vezes, anotando-se o valor médio. A soja foi colocada na estufa (figura 4.7) regulada em 130 °C (temperatura interna) por 15 minutos nas duas primeiras etapas.



**Figura 4.7 - A soja nos cadinhos sendo colocado na estufa em uma temperatura de 130°C  
+/-3 °C**

Este material foi esfriado no dessecador contendo um agente dessecante eficiente (sílica-gel) e novamente o peso e a capacitância foram medidos. Essa soja retornou para a estufa e permaneceu por mais 30 minutos na etapa três até a décima etapa, por uma hora nas próximas etapas até obter a base seca, pelo critério da variação do peso, sendo esta variação menor do que 1 g nas três últimas secagens. Em cada etapa a soja foi pesada no momento que em que saiu da estufa e após esfriar, para obter a variação do peso no processo de esfriamento, esfriada no dessecador contendo um agente dessecante eficiente, e novamente o peso e a capacitância foram medidos. Ambos os capacitores foram preenchidos com a soja, no qual esta se encontrava a temperatura ambiente.

Na ação “medidas da soja”, são relacionadas medição do peso de cada cadinho na balança de precisão e a capacitância (pF) dos capacitores com grãos funcionando como o dielétrico que separa as placas (pF).

Onde:

N= passos (etapas);

T= tempo (minuto).

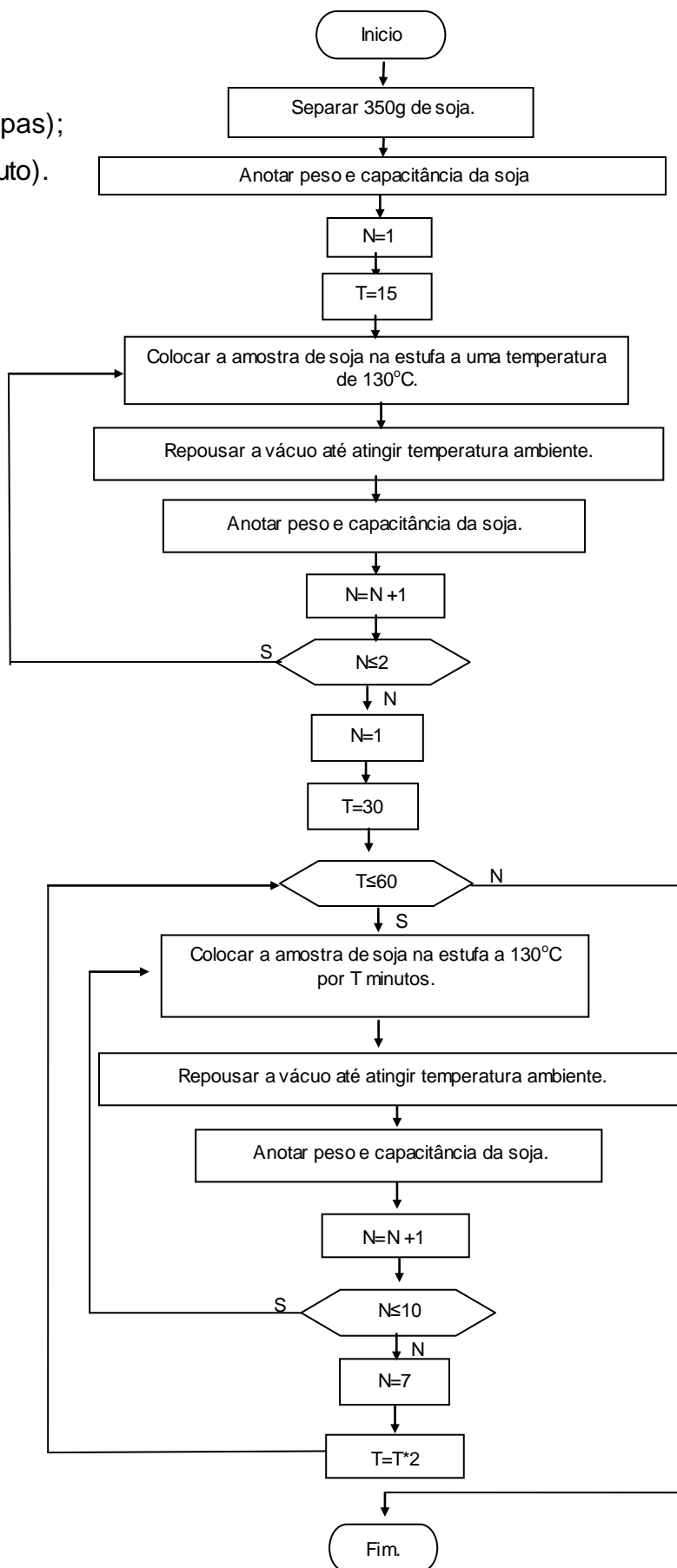


Figura 4.8 - Fluxograma do Processo de Secagem.

Obedecendo todos os passos do fluxograma do processo de secagem, figura 4.8, obteve-se as curvas de secagem de cada amostra para determinar a base seca, como demonstra na figura 4.9. Como foi citado anteriormente, cada amostra de soja tem a umidade inicial diferente, sendo assim obedeceu-se ao critério de parada, em que a variação da massa de soja nas últimas três medidas deva ser menor que 1g, para determinar a massa seca.

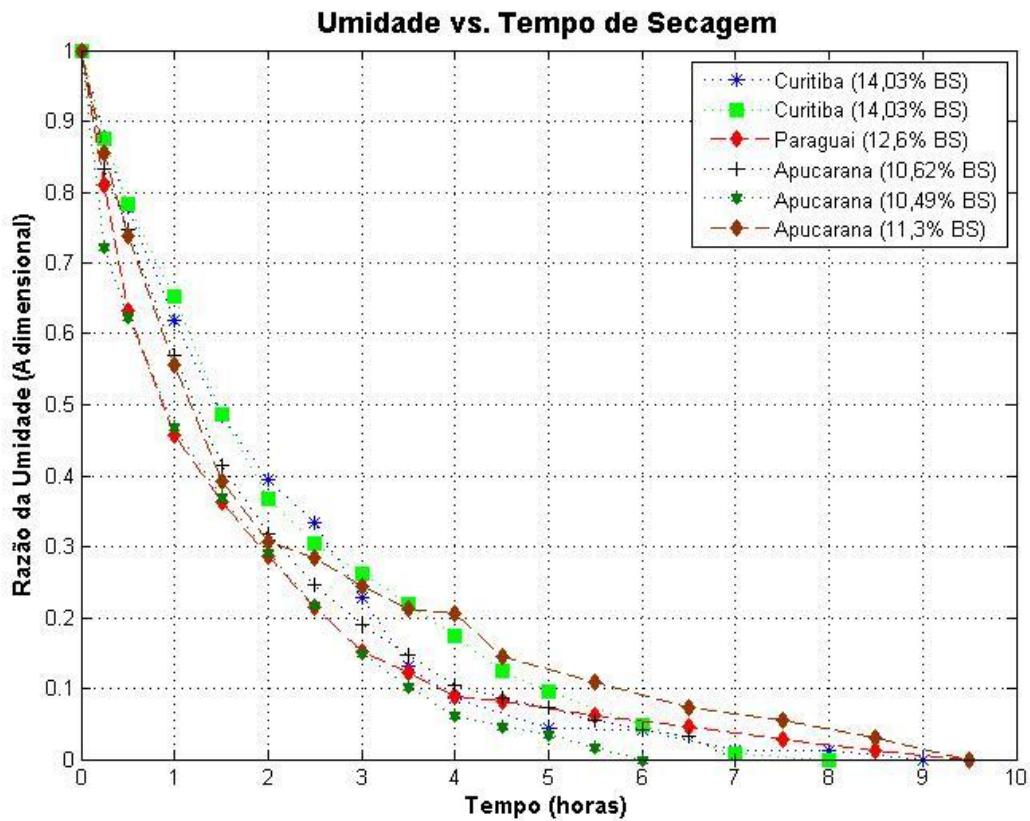


Figura 4.9: Curva de secagem (Base Seca)



## 5 Resultados e Discussões.

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados alcançados através da metodologia empregada nesta pesquisa.

Conforme o fluxograma da figura 4.6, nota-se na figura 5.1 que a permissividade relativa dos grãos de soja é sensível à temperatura para os diferentes níveis de umidade. Quanto maior a umidade contida nos grãos de soja, maior a variação da capacitância em relação à temperatura. Isto em ambos os capacitores: capacitor cilíndrico e capacitor de placas paralelas.

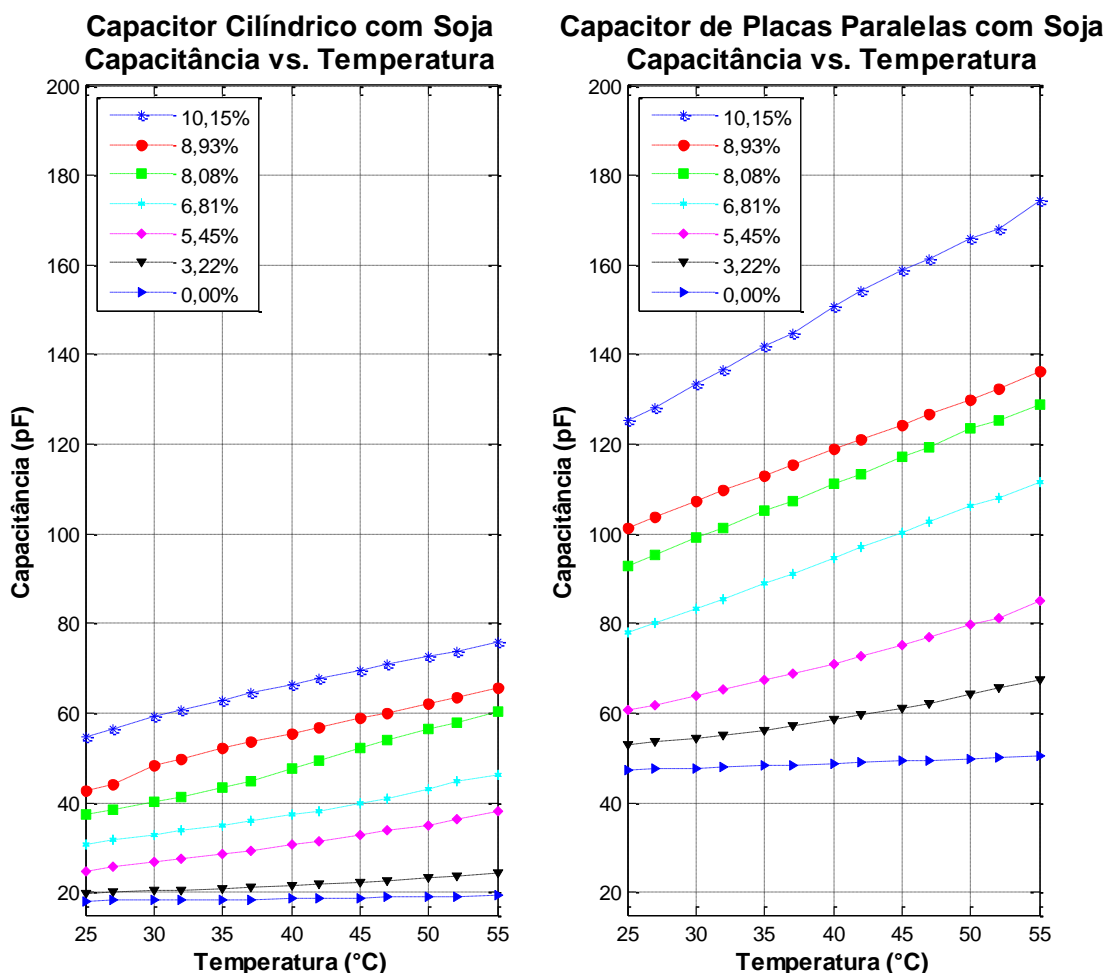


Figura 5.1 — Capacitância para cada Temperatura em Ambos os Capacitores.

Através da figura 5.1 pode-se observar a dinâmica da variação da temperatura (°C) em função da capacitância (pF), verificando-se a influência do teor

de umidade dos grãos no processo de secagem. Ambos os capacitores tem comportamento linear. Entretanto, o capacitor de placas paralelas apresenta uma maior variação da capacitância em relação à temperatura dos grãos, ou seja, esse dispositivo é mais sensível à variação de temperatura se comparado ao capacitor cilindros coaxiais. Observa-se, também, que em ambos os modelos de capacitores o nível de umidade dos grãos de soja, é diretamente proporcional a capacitância e aos valores de temperatura.

Para evidenciar que a variação da capacitância medida ocorre predominantemente devido à variação da temperatura, e não devido à variação de umidade durante o processo de esfriamento dentro do capacitor, a tabela 5.1 apresenta a variação percentual do peso da amostra de soja durante o processo de esfriamento. Com os dados da tabela 5.1 observa-se que a variação do peso (umidade) durante o esfriamento é pequeno, menor do que 0,5%. Esta variação de umidade não justifica variação da capacitância durante o esfriamento.

**TABELA 5.1: VARIAÇÃO (%) DO PESO DA AMOSTRA NO PROCESSO DE ESFRIAMENTO.**

Umidade (%)	Peso da Soja Quente (g) a 55°C	Peso da Soja após esfriar (g) a 25°C	Varição (%)
10,73	255,623	254,5741	-0,412
9,22	252,133	251,7599	-0,148
8,23	249,8395	249,7869	-0,021
7,01	247,041	246,8545	-0,076
5,66	243,9266	243,7156	-0,087
3,31	238,4942	238,5642	0,029
1,98	235,4227	235,5321	0,046
0,62	232,2785	232,288	0,004
0,00	230,8497	231,1203	0,117

Analisando os dados obtidos durante o processo de esfriamento, observou-se que no início do processo os grãos de soja demoram mais tempo para esfriar, pois o seu teor de umidade é mais alto e, quando se encontram com baixo teor de umidade os grãos de soja esfriam mais rápido.

Também, foi observado que os grãos de soja perdem umidade durante o processo de esfriamento até atingir 5,66% de umidade. Entretanto, para níveis de umidade menores do que 5,66% os grãos de soja passam a absorver umidade do ambiente, conforme apresentam os dados da tabela 5.1.

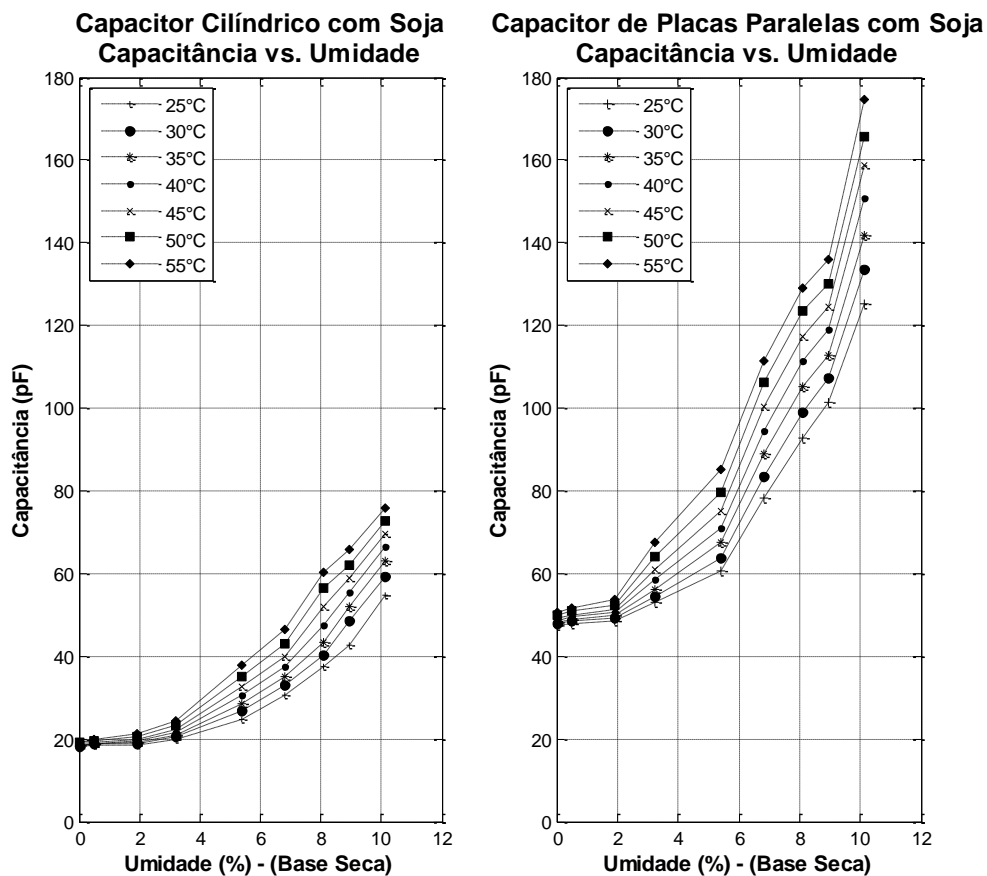


Figura 5.2 - Capacitância (pF) vs Umidade (Base Seca) (%)

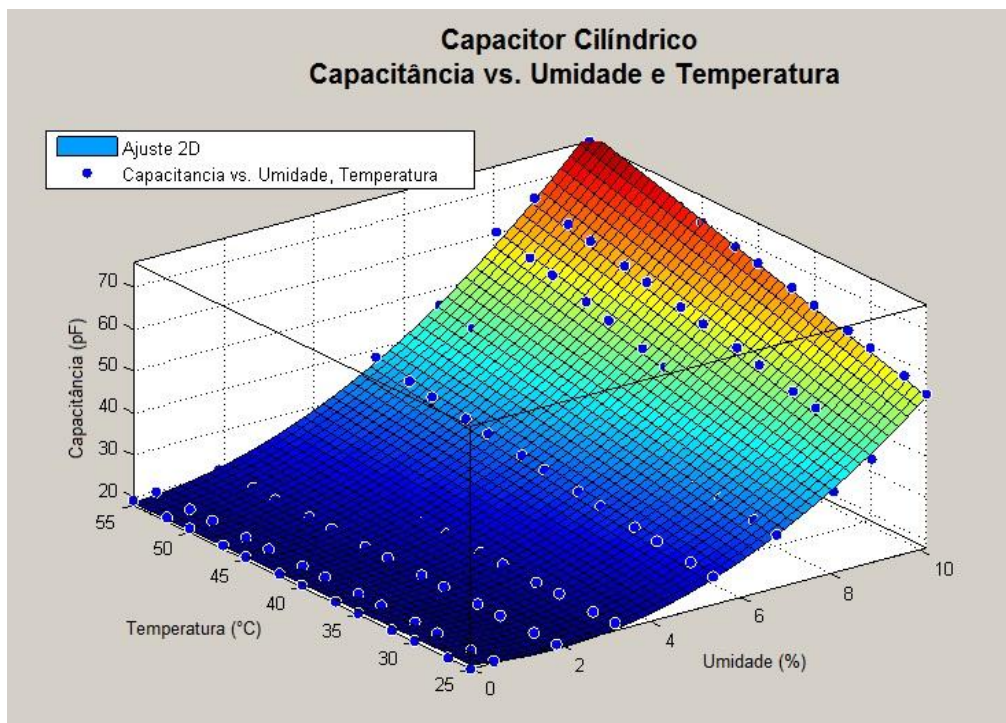


Figura 5.3 - Capacitância em Função da Umidade (Base Seca) e Temperatura.

Analisando-se os dados das figura 5.1 e 5.2, pode-se observar que a capacitância tem a dependência linear com a temperatura e não-linear com a umidade. Assim, onde se foi encontrado um primeiro modelo simples que pudesse explicar o comportamento dos dados. A distribuição espacial da capacitância em função da umidade e temperatura está representada na equação 5.1:

Na figura 5.3, pode-se observar a dependência linear entre a capacitância e a temperatura dos grãos de soja e, a dependência quadrática de segunda ordem entre a capacitância e a umidade contida nos grãos de soja. A função de duas variáveis que descreve a superfície quadrática é apresentada na equação 5.1.

$$C(u,t) = 0,5294u^2 + 0,08069ut - 0,01751t - 3,946u + 19,64 \quad (5.1)$$

onde:

C = capacitância (pF);

u = umidade em % base seca;

t = temperatura (°C).

Conhecer a relação da capacitância em função da umidade e da temperatura dos grãos é fundamental para que seja possível fazer o controle em malha fechada do processo de secagem da soja. Isso é importante, porque no secador a soja poderá estar em diferentes temperaturas, dependendo do tipo de secador, ou até mesmo da temperatura ambiente. Assim, conhecer a dependência entre essas variáveis poderá trazer maior precisão e flexibilidade para a modelagem de um dispositivo eletrônico de controle em malha fechada que utiliza medida capacitiva.

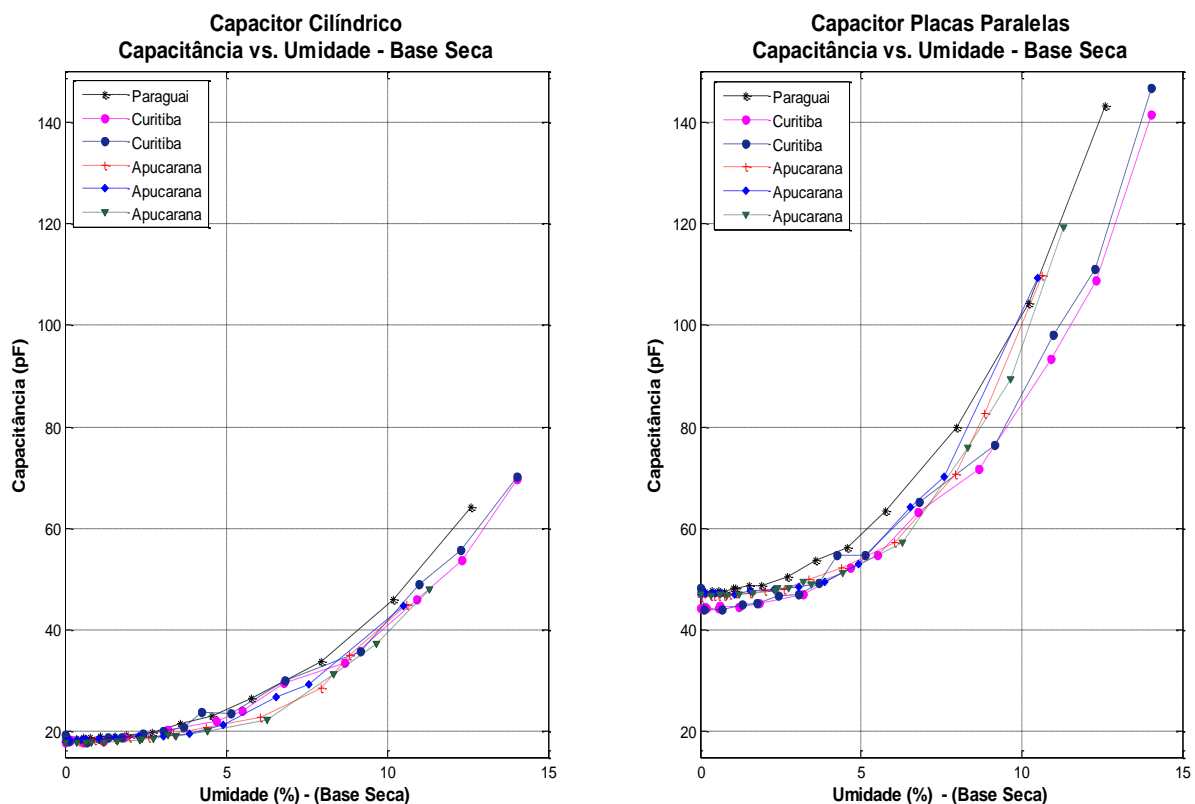
A partir da aplicação do processo de secagem apresentado no fluxograma da figura 4.8, encontraram-se os valores da capacitância medida para cada percentual de umidade (base seca) das diferentes amostras de soja. Esse procedimento foi aplicado às amostras de soja de diferentes procedências para verificar a repetibilidade das medidas, com o objetivo de estimar os erros de medição.

Os erros envolvidos nesse procedimento são os erros dos instrumentos, neste caso, do capacímetro e da balança de precisão. Em ambos os instrumentos existem razões para a ocorrência destes erros. No capacímetro as medidas sucessivas são a causa, pois cada ponto é o resultado da média de cinco medidas.

Na balança a origem do erro está nas diferenças entre as amostras, uma vez que são de diferentes regiões e possuem quantidades iniciais de umidade diferentes.

O erro dos instrumentos, balança de precisão e capacitômetro são pequenos, sendo respectivamente 0,0005g e +/- 0,5 %. As medidas sucessivas diminuem o erro devido à compactação (acomodação) dos grãos de soja no capacitor, sendo erros suprimidos devido à realização da média dos valores de capacitância medidos. E o erro referente ao tipo de soja é difícil de ser estimado, devido às características específicas de cada espécie de soja.

Realizando todas as etapas do fluxograma do processo de secagem, figura 4.8, encontra-se os valores da capacitância medida para cada percentual de umidade (base seca) das amostras de soja.



**Figura 5.4 - Capacitância vs. Umidade (Base Seca)**

A figura 5.4 apresenta a variação da capacitância em relação à umidade dos grãos de soja em temperatura ambiente. No início da secagem, a evaporação de água é mais intensa, diminuindo no decorrer do processo, tornando-se muito pequena no final. Isto pode ser explicado, pois, neste momento, os efeitos de

transferência de massa tornam-se desprezíveis, quando os grãos tendem a alcançar os teores de umidade de equilíbrio. Assim, quando o grão possui um alto teor de umidade, grande parte dessa água se concentra nos poros dos grãos, sendo mais fácil sua liberação. Já com baixos teores de umidade, a concentração de água nos poros é menor, sobrando à água que faz parte da composição das moléculas dos grãos, que é mais difícil de ser liberada.

As curvas de secagem da figura 5.4 indicam que a variação de capacitância é mais elevada para teores de umidade maiores e variação de capacitância mais lenta para teores de umidade mais baixos.

Os resultados confirmam a correlação entre capacitância e a umidade dos grãos. Verifica-se que grãos com maior umidade demonstram uma constante dielétrica mais elevada resultando numa capacitância medida de maior valor.

Para ambos os modelos de capacitores, os dados encontrados passaram por um tratamento matemático que possibilita uma avaliação de confiabilidade dos resultados obtidos.

A análise estatística da capacitância para o capacitor de placas paralelas e para o capacitor de placas cilíndricas concêntricas foi efetuada através da análise do desvio padrão. O desvio padrão é uma das medidas de dispersão e representa a raiz quadrada da variância, ou seja, representa a diferença entre a média e o valor observado.

Na busca do erro de repetibilidade das medidas, a análise da soja em cada amostra foi realizada em algumas etapas. Foram utilizados 640g de grão de soja, com umidade de 12,78% (base seca), verificando-se o peso de cada cadinho na balança eletrônica para posterior análise do conteúdo de umidade pela diferença do peso, e a capacitância resultante do capacitor cilíndrico e do capacitor de placas paralelas com a soja agindo como dielétrico. As medidas de capacitância foram repetidas por cinco vezes, durante três dias diferentes. A soja foi colocada na estufa (figura 4.7) regulada em  $130\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperatura interna) por 8 horas seguidas para obter a base seca da soja. Esse processo se repetiu por três vezes. Com esses dados das amostras, obtive o seguinte tratamento matemático:

TABELA 5.2: TRATAMENTO DE DADOS DA PESQUISA

<b>Capacitância</b>		
	<u>Capacitor Cilíndrico</u> <u>Concêntrico</u>	<u>Capacitor Placas</u> <u>Paralelas</u>
<b>Média</b>	52,78 pF	125,48 pF
<b>Variância</b>	8,37 pF	47,08 pF
<b>Desvio Padrão</b>	2,86 pF	6,80 pF

Considera-se a barra de erro, com um nível de incerteza de 68,3% que corresponde a  $\pm 1\sigma$ .

A barra de erro depende do percentual de umidade. À medida que os grãos de soja vão secando menor é a barra erro. Considerou-se uma variação linear da barra de erro no intervalo de 12% a 0% de umidade. Foi definida utilizando a seguinte função:

$$BE_{par}(u) = 0,54u - 0,0013 \quad (5.2)$$

Onde:

$BE_{par}$  = barra de erro do capacitor de placas paralelas;

u = umidade em % base seca;

Desta forma, foram obtidos os gráficos da figura 5.5, 5.6 e 5.7, nos quais as curvas foram separadas por cooperativas. Cada curva apresenta a capacitância dos grãos de soja, e as respectivas barras de erro (obtidas com a equação 5.2), em função da umidade percentual medida com o capacitor de placas paralelas.

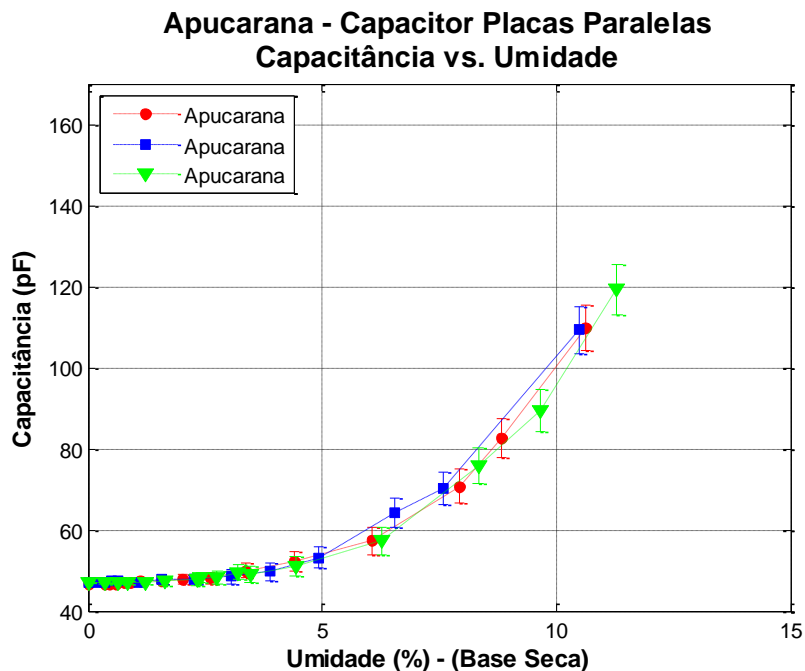


Figura 5.5 - Valores médios dos grãos de soja da cooperativa de Apucarana com duas incertezas e representado pelas barras de erros.

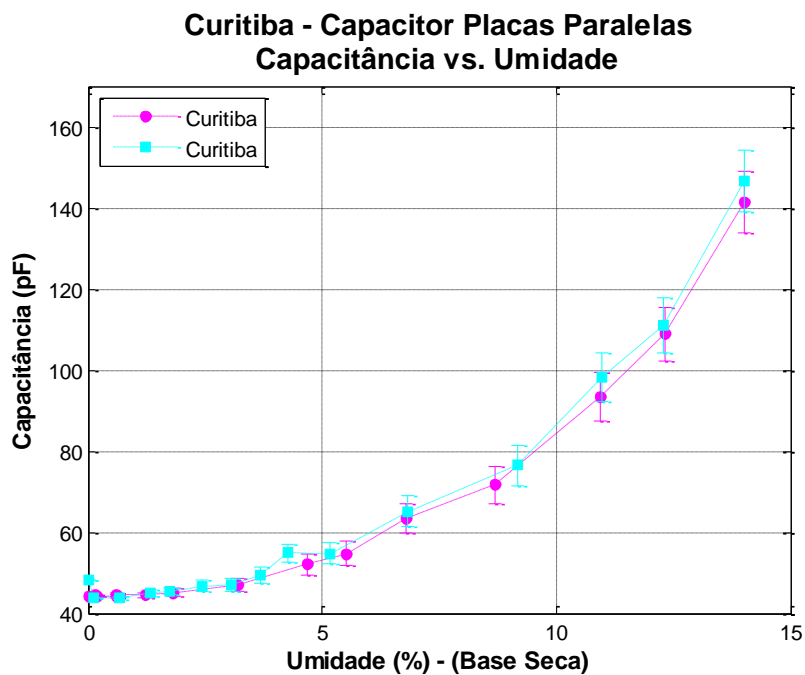
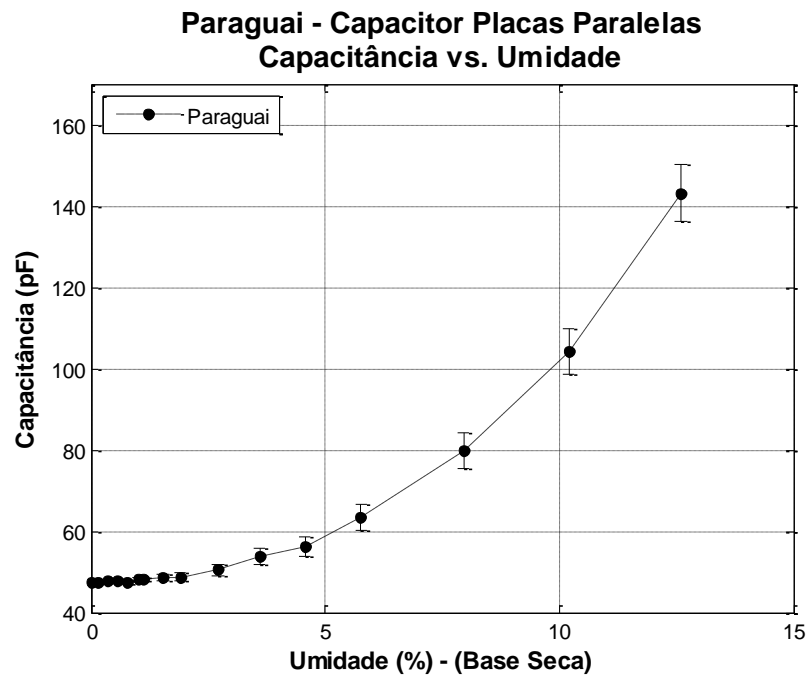


Figura 5.6 - Valores médios dos grãos de soja da cooperativa de Curitiba com duas incertezas e representado pelas barras de erros





**Figura 5.7 - Valores médios dos grãos de soja da cooperativa de Paraguai com duas incertezas e representado pelas barras de erros**

Para o capacitor cilíndrico coaxial a barra de erro com um nível de incerteza de 68,3%, ou seja com  $\pm 1\sigma$ , foi definida utilizando a seguinte função:

$$BE_{cyl}(u) = 0,23u - 0,0017 \quad (5.3)$$

Onde:

$BE_{cyl}$  = barra de erro do capacitor cilíndrico;

$u$  = umidade em % base seca;

Desta forma, foram obtidos os gráficos das figuras 5.8, 5.9 e 5.10, agrupados por cooperativas. Cada gráfico apresenta a variação da capacitância em função da umidade para o modelo obtido com o capacitor cilíndrico, juntamente com as barras de erro dos valores de capacitância medidos, obtidas com a equação 5.3.

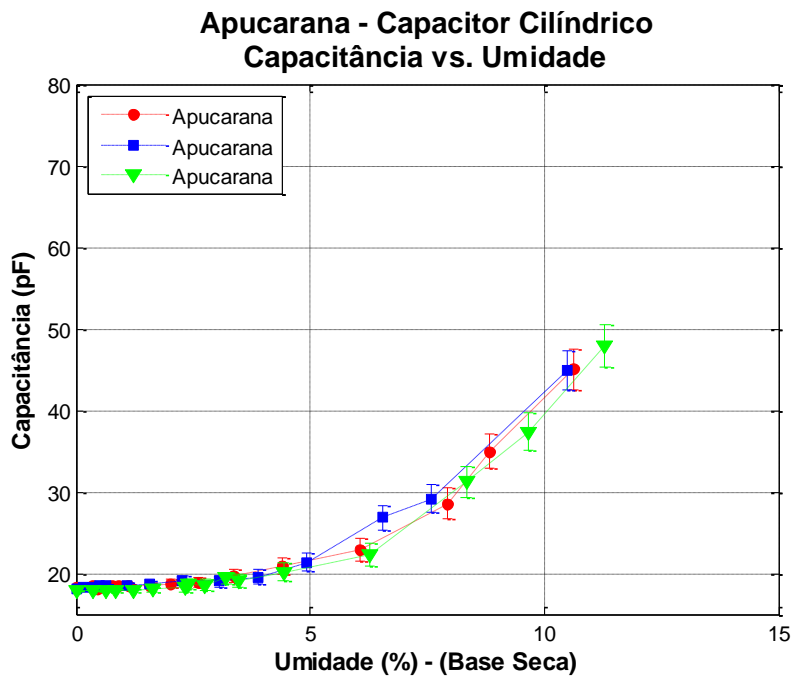


Figura 5.8 - Valores médios com barras de erro dos grãos de soja da cooperativa de Apucarana.

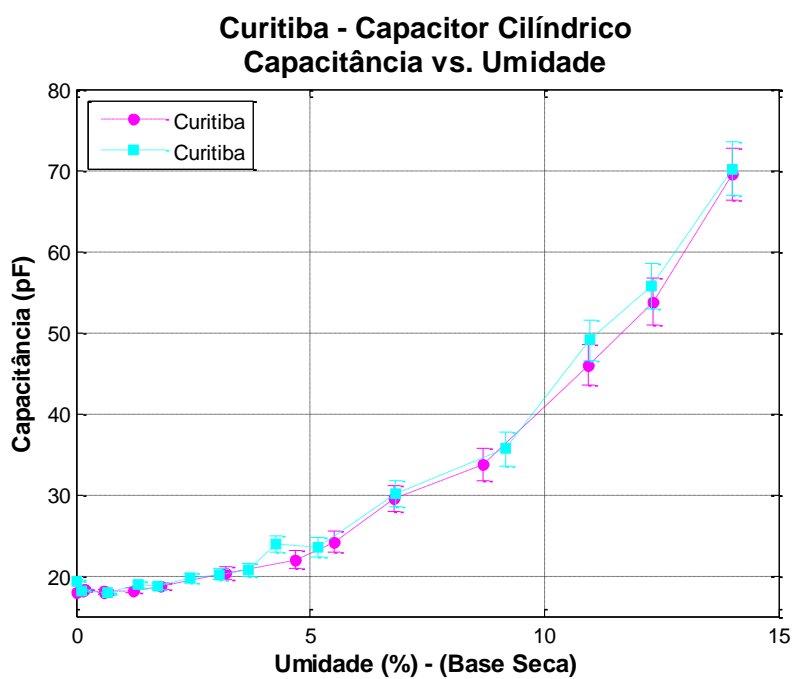
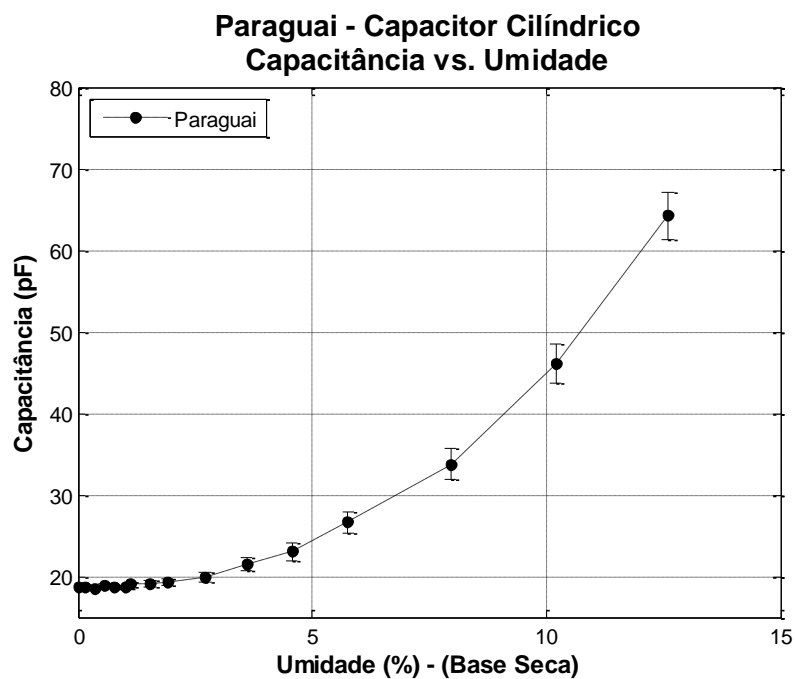


Figura 5.9 - Valores médios com barras de erro dos grãos de soja da cooperativa de Curitiba.



**Figura 5.10 - Valores médios com barras de erro dos grãos de soja da cooperativa de Paraguai.**

Aplicando o ajuste de curva para cada medida, encontrou-se a curva de aproximação para ambos os capacitores (figura 5.14), sendo esta uma curva polinomial de segunda ordem.

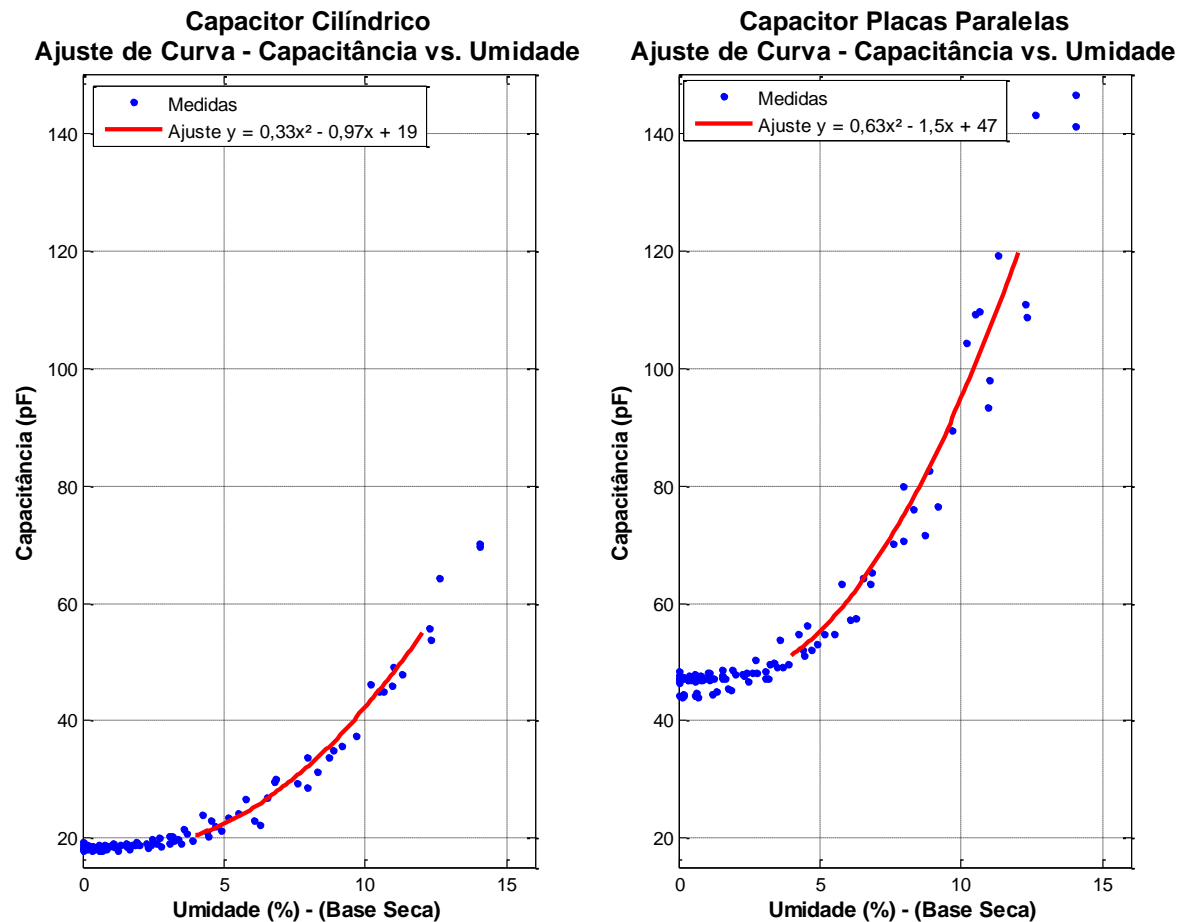


Figura 5.11 - Curva de Aproximação de Ambos os Capacitores.

Para o capacitor cilíndrico, o ajuste de curva de aproximação apresenta uma função de aproximação:

$$C_1(u) = 0,33u^2 - 0,97u + 19 \quad (5.18)$$

No capacitor de placas paralelas, o ajuste de curva de aproximação apresentou a seguinte função:

$$C_2(u) = 0,63u^2 - 1,5u + 47 \quad (5.19)$$

Ao encontrar a curva de aproximação para ambos os capacitores, calculamos a inversa das equações 5.18 e 5.19, obtendo a umidade em função da capacitância.

Conhecendo-se a umidade em função da capacitância, torna-se possível encontrar a umidade dos grãos de soja a partir das medidas de capacitância determinadas nos capacitores, encontrando-se então um modelo. Sendo este modelo encontrado o real objetivo deste projeto.

Os valores de capacitância medidas nos experimentos foram aplicados nas funções inversas encontradas para cada modelo de capacitor. Comparando os valores de umidade encontrados no modelo com os valores de umidade obtidos pela balança de precisão, obteve-se o gráfico da figura 5.12.

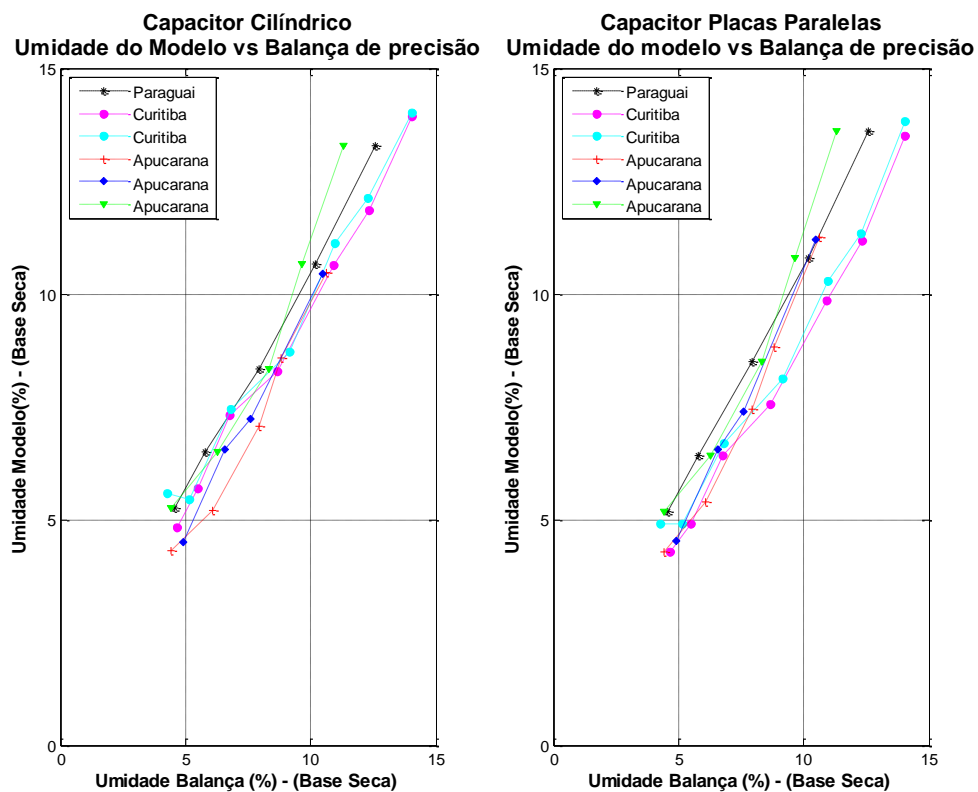


Figura 5.12 – Umidade percentual Balança vs Umidade percentual do Modelo.

Para ambos os capacitores, observou-se boa correlação entre o valor de umidade medido a partir da capacitância e o valor de umidade medida a partir da pesagem. Isso se verifica no gráfico pelos pontos que estão próximos ao eixo de  $45^\circ$ .

Utilizando todos os valores de umidade encontrados na balança de precisão e a umidade percentual do capacitor de placas paralelas e do capacitor cilíndrico concêntrico, obtemos o erro residual e o desvio padrão.

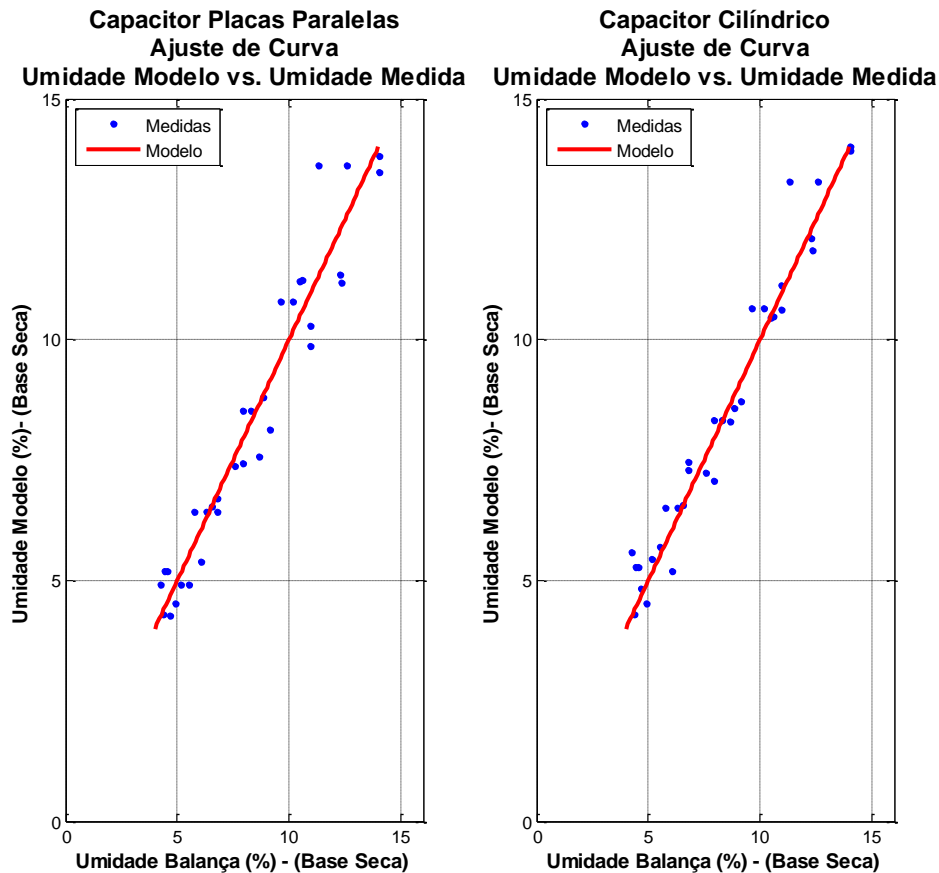
**TABELA 5.3: CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS – ERRO RESIDUAL E DESVIO PADRÃO (BASE SECA)**

	<b>Umidade pelo Capacitor de Placas Paralela</b>	<b>Umidade pela Balança</b>	<b>Erro Percentual</b>	<b>SE</b>
1	13,60	11,30	-17%	5,31
2	10,80	9,66	-11%	1,30
3	8,51	8,33	-2%	0,03
4	6,43	6,28	-2%	0,02
5	5,19	4,43	-15%	0,57
6	11,20	10,49	-6%	0,51
7	7,38	7,58	3%	0,04
8	6,54	6,55	0%	0,00
9	4,52	4,92	9%	0,16
10	11,24	10,62	-6%	0,39
11	8,81	8,84	0%	0,00
12	7,44	7,94	7%	0,25
13	5,39	6,06	12%	0,44
14	4,29	4,40	3%	0,01
15	13,82	14,03	2%	0,04
16	11,34	12,29	8%	0,90
17	10,28	10,98	7%	0,50
18	8,13	9,17	13%	1,07
19	6,70	6,82	2%	0,02
20	4,91	5,15	5%	0,06
21	4,91	4,26	-13%	0,43
22	13,49	14,03	4%	0,30
23	11,17	12,32	10%	1,32
24	9,85	10,93	11%	1,16
25	7,56	8,69	15%	1,28
26	6,41	6,79	6%	0,14
27	4,90	5,52	13%	0,38
28	4,28	4,69	10%	0,17
29	13,60	12,60	-7%	1,01
30	10,80	10,20	-6%	0,36
31	8,51	7,96	-6%	0,30
32	6,43	5,77	-10%	0,44
33	5,19	4,57	-12%	0,38
<b>SSE</b>	<b>19,31</b>			
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,76</b>			

Onde SSE= soma de quadrados dos Resíduos.

**TABELA 5.4: CAPACITOR CILÍNDRICO CONCÊNTRICO - ERRO RESIDUAL E DESVIO PADRÃO (BASE SECA)**

Umidade pela Balança (%)	Umidade pelo Capacitor Cilíndrico (%)	Erro Percentual	SE
11,30	13,27	17%	3,89
9,66	10,65	-1%	0,99
8,33	8,33	-2%	0,00
6,28	6,51	1%	0,05
4,43	5,26	2%	0,70
10,49	10,44	-7%	0,00
7,58	7,22	-2%	0,13
6,55	6,55	0%	0,00
4,92	4,51	0%	0,17
10,62	10,47	-7%	0,02
8,84	8,59	-3%	0,06
7,94	7,06	-5%	0,77
6,06	5,19	-4%	0,75
4,40	4,31	0%	0,01
14,03	14,01	1%	0,00
12,29	12,11	7%	0,03
10,98	11,12	8%	0,02
9,17	8,73	7%	0,19
6,82	7,46	11%	0,41
5,15	5,44	11%	0,08
4,26	5,57	13%	1,72
14,03	13,93	3%	0,01
12,32	11,84	6%	0,23
10,93	10,63	8%	0,09
8,69	8,30	10%	0,16
6,79	7,30	14%	0,26
5,52	5,68	16%	0,03
4,69	4,81	13%	0,02
12,60	13,27	-2%	0,45
10,20	10,65	-1%	0,21
7,96	8,33	-2%	0,13
5,77	6,51	1%	0,54
4,57	5,26	2%	0,48
<b>SSE</b>	<b>12,61</b>		
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,62</b>		



**Figura 5.13 – Ajuste de Curva da Umidade percentual do Modelo vs Umidade percentual da Balança de Precisão**

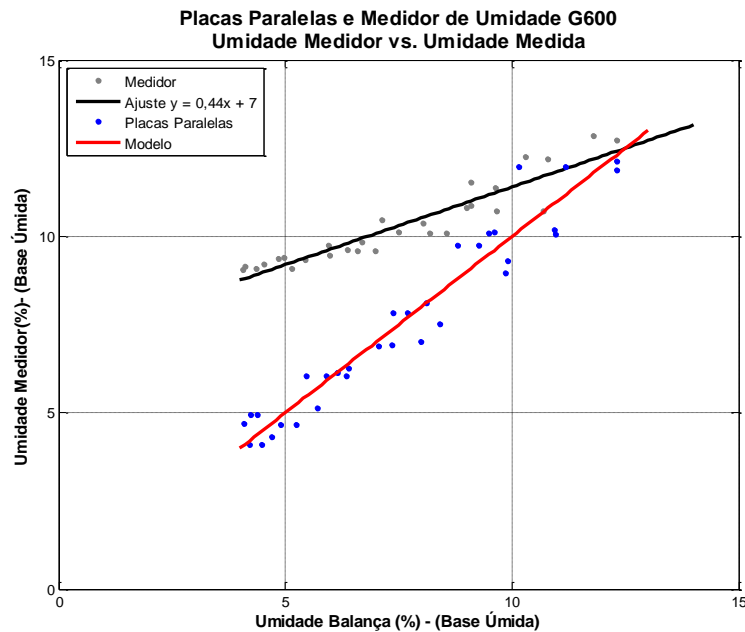
A figura 5.13, apresenta o ajuste de curva do modelo no qual se encontra calibrado em ambos os capacitores, que é idealmente uma reta em  $45^\circ$  que passa pela origem do plano cartesiano. O modelo, em vermelho, representa os valores ideais, como se não tivessem ocorrido desvios nas medidas realizadas com os capacitores. Os pontos azuis representam os pontos obtidos com as medidas de umidade feitas com os capacitores em relação à umidade medida na balança de precisão.

O medidor de umidade G600 é um equipamento eletrônico que utiliza um capacitor de placas paralelas para fazer as medidas de umidade dos grãos, que indica o percentual de umidade em base úmida. Logo, foi realizada uma comparação entre o medidor de umidade G600 e o capacitor de placas paralelas, sendo os dois modelos com o percentual de umidade em base úmida. Fazendo esta comparação, obteve-se o gráfico da figura 5.14.



**TABELA 5.5: MEDIDOR DE UMIDADE G600 E O CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS – VARIÂNCIA E DESVIO PADRÃO (BASE ÚMIDA)**

<b>Base Úmida</b>		
	<u>Medidor de Umidade</u>	<u>Capacitor Placas</u>
	<u>G600</u>	<u>Paralelas</u>
<b>SSE</b>	4,5 %	13,2 %
<b>Desvio Padrão</b>	0,39 %	0,63 %



**Figura 5.14 – Umidade do Medidor de Umidade (%) vs Umidade do Capacitor de Placas Paralelas (Base Úmida).**

Na figura 5.14, observa-se que as medidas obtidas pelo G600 não se alinham com a reta de 45° indicando que os valores não estão calibrados nesta faixa de medição. Inclusive, o próprio fabricante alerta que o aparelho não está concebido para fornecer leituras de valores abaixo de 8% de umidade. Já as medidas realizadas neste trabalho apresentaram uma boa exatidão, verificada pela concordância dos pontos com a reta de 45°. Isto ocorre pelo fato do modelo polinomial ter sido determinado a partir das medidas obtidas nesta faixa de 4% a 12%.

A precisão foi muito próxima em ambos os dispositivos, com pequena vantagem para o medidor de umidade G600. Tanto os pontos obtidos com o capacitor de placa paralela e do medidor de umidade tiveram desvio padrão ambos próximos a 0,5 pontos percentuais, conforme indica a Tabela 5.5.

## 6 CONCLUSÃO

Determinar o teor de umidade presente nos grãos de soja requer conhecimento de métodos que podem variar segundo escolha do profissional que o faça. Avaliou-se o método de medição da capacitância dos grãos de soja como forma de determinar seu teor de umidade. O teor de umidade dos grãos apresentou uma relação não linear com a capacitância medida, conforme reportado por outros trabalhos. Em ambos os modelos de capacitores quanto maior é o nível de umidade dos grãos de soja, maior é a capacitância.

Confirmaram-se as evidências de estudos anteriores que indicavam uma boa relação entre umidade e a capacitância do grão de soja. Estudos adicionais foram realizados para quantificar a influência da temperatura e aferir a precisão deste método com vistas à sua utilização para medição da umidade dentro do secador.

Foram realizadas medidas com amostras de soja de diferentes regiões que apresentaram certa variabilidade de acordo com o tamanho do grão.

No secador a soja poderá estar em diferentes temperaturas. Assim, conhecendo a dependência entre essas variáveis pode-se obter maior exatidão e flexibilidade para a construção de um dispositivo eletrônico de controle em malha fechada que utiliza medida capacitiva.

Para se obter o erro de repetibilidade, foram realizadas 35 medições da capacitância em dias diferentes com grãos de soja com 12% de umidade. O desvio padrão do erro no capacitor de placas paralelas foi 0,76% e no capacitor cilíndrico concêntrico foi de 0,62% (pontos percentuais em base seca). Também verificou-se que o erro é menor para umidades mais baixas.

Foi utilizada uma relação quadrática para modelar a variação da capacitância com a umidade na faixa de 4% a 12% e uma relação linear para explicar a variação com a temperatura (25 a 55 °C). O desvio padrão do erro de exatidão obtido com esta abordagem foi de 0,6 pontos percentuais de umidade (base seca).

Como estudo futuro sugere-se a aplicação avaliação do método de medição capacitivo no interior secador, com os grãos em movimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAO, Y.; ZHU, Z., WU, Y.; HE, Y., 2005. **Study on Rapid Measurement of Soybeans Moisture Content Based on Dielectric Properties.**, IEEE Instrumentation and Measurement, Technology Conference, p.232-255 Ottawa, Canada, 17-19.

BIOPRECISA, Manual de instruções – Balança Eletrônica FA 2104N.

BOERI, C. N., 2007. **Modelagem Matemática da Secagem de Grãos de Soja em Camada Fina.** Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.

BORGES, P. A. P., 2002. **Modelo dos Processos Envolvidos nos Sistemas de Secagem e Armazenamento de Grãos.** Tese (Doutor em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CANÇADO, R. A., 2004. **Avaliação Microbiológica e Micotoxicológica De Grãos de Milho (*Zea Mays Linné*) e Soja (*Glycine Max. (Linné) Merrill*) Provenientes de Cultivo Convencional das Sementes Naturais e Geneticamente Modificadas.** Tese de Doutorado em Tecnologia de Alimentos, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR.

DUARTE, R.J.C., 2010. **Análise de Segurança Proposta na Fabricação de Silos Armazenadores de Grãos: Um Estudo de Caso.** Monografia submetida a Universidade de Mato Grosso para obtenção do Grau de Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho. Cuiabá, MT.

ERRERA, M. R.; FILIPINI, F.A.; STANESCU, G., 2003, **Exergy Analysis of Equipment for drying of soy beans with cogeneration or trigeneration.** Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM, São Paulo

GEHAKA, Manual do usuário do Medidor de Umidade G600

GOMES, P.. **A SOJA.**1986 Biblioteca Rural- Livraria Nobel S/A. São Paulo- SP.6<sup>a</sup> edição.

HALLIDAY, D.; RENICK, R.; WALTER, J., 1996. **Fundamentos de Física 3-Eletromagnetismo**, 4<sup>a</sup> edição.

ICEL, Manual do Capacímetro digital CD-300

KAWAGA, A..Ed. Standard table of food composition in Japan. Tokyo: University of Nutrition for women, 1995. p. 104 – 105. Disponível em: [http://www.cnpso.embrapa.br/soja\\_alimentacao/index.php?pagina=7](http://www.cnpso.embrapa.br/soja_alimentacao/index.php?pagina=7). Acesso em: 08/06/2010.

KRASZEWSKI, A.W.; YOU, T. S.; NELSON, S.O., 1989. **Microwave resonator technique for moisture content determination in single soybean seeds**. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Volume 38.

LIRA, T. S.; 2005. **Contribuição a Modelagem da Secagem em Leite Deslizante Concorrente**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MACHADO, K. D. **Teoria do Eletromagnetismo**. Volume 1, 2ª edição, editora UFPR.

MATTOS, M. P., 1987, **Soja: a mais importante oleaginosa da agricultura moderna**. Editora Ícone. Coleção Brasil Agrícola, São Paulo, SP.

MIMIPA, Manual do usuário do Multímetro Digital TE-2650

NELSON, O. S., 1991. **Dielectric Properties of Agricultural Products**. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Volume 26 No. 5, p. 845 – 869.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A., 2003. **Circuitos Elétricos**. Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.. Rio de Janeiro, RJ

NOVA ÉTICA, Manual do usuário. **Estufa de Esterilização e Secagem**, modelo: serie 400ND, Nova Ética Ind. Com. e Serviços. Vargem Grande Paulista.

OLIVEIRA, A.L.R., 2005, **Otimização de Recebimento e Distribuição em Unidades Armazenadoras de Soja**. Dissertação de Mestrado em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K. J. B., 2007. **Conceitos de Processo e Equipamento de Secagem**. VT&EA. Campinas. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>. Acesso em: 20/02/2009.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C., 2006. **Análises de Materiais Biológicos**. UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola.

PESKE, S. T.; HOFES, A.; HAMER, E., 2004, **Seed moisture range in a soybean plant**. Revista brasileira de Sementes, Pelotas, v. 26, n. 1.

PRISMATÉC, Manual do usuário da Bomba a Vácuo 131 e 132

PUZZI, D., 1977, **Manual de armazenamento de grãos**. Agronômica Ceres, São Paulo, SP.

SEARS; ZEMANSKY; YUNG.,1984. **Física 3 – Eletricidade e Magnetismo**, 2º edição, livros técnicos e científicos editora.

SILVA, D.C.; KAZAMA, R.; FAUSTINO, J.O.; ZAMBOM, M.A., SANTOS, G.T.; BRANCO, A.F., 2004, **Digestibilidade *in vitro* e degradabilidade *in situ* da casca de soja, resíduo de soja e casca de algodão**. Acta Scientiarum Animal Sciences, Maringá - PR, V.26, nº 4, p. 501-506..

SILVA, L. C., 2005. **Secagem de Grãos**. Boletim Técnico: AG 04/05 em 29/03/2005. Campus de Alegre – Alegre:ES. Universidade Federal do Espírito Santo.

SILVA, L. C., 2006. **Operação de Secadores Cascata**. Boletim Técnico: AG 02/06 em 18/06/2006. Departamento de Engenharia Rural - Universidade Federal do Espírito Santo.

SILVA, L. C., 2009. **Quebras de Impureza e Umidade**. Boletim Técnico: AG 01/09 em 04/03/2009. Departamento de Engenharia Rural – Universidade Federal do Espírito Santo.

SIRIKULRAT, K.; SIRUKUTRAT, N., 2008. **Dielectric Properties of Different Maturity soybean**. KMITL Sci. J. Vol.8 N<sup>o</sup>.2 (Section A), Chiang Mai, Thailand.

TEIXEIRA, G. V., 2001. **Avaliação das Perdas Qualitativas no Armazenamento da Soja**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, na Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP.

## BIBLIOGRAFIA ADICIONAL

ALMEIDA, O.; CALÇADA, L. A.; MASSARANI, G., 2002. **Análise de um Sistema para Levantamento de Isotermas de Secagem**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Série Ciências Exatas da Terra, Volume 21(1), p. 49-53, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/editora/RCET/suplemento/calçada%20iii.pdf>> Acesso em: 15/10/2009.

ARAUJO, M. A., 2008. **Modelos Agrometeorológicos na Estimativa da Produtividade da Cultura da Soja na Região de Ponta Grossa – Paraná**, Dissertação de Mestrado em Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba.

NETZ, R. B. L.; DALMOLIN, R. C., 2007. **Otimização de Processo de Secagem de Grão de Soja Utilizando a Tecnologia Hils**. Dissertação (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

NEVES, I. P., 2007. **Dossiê Técnico Armazenamento de Grãos**. RETEC/BA-Rede de Tecnologia da Bahia.

SANTOS, M.A, 2007. **Qualidade de Semente de Trigo Secas sob Utilização de Energia Elétrica e Associada a Gás Liquefeito de Petróleo**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNOESTE, Cascavel –PR.

WERNER, V., 2004. **Utilização de Recursos de Agricultura de Precisão na Geração de Mapas de Atributos, Mapas de Produtividade e Aplicação de Insumos a Taxas Variáveis**. Dissertação Mestrado em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.