

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JÉSSIMON FERREIRA

SISTEMAS CAPACITIVOS APLICADOS NA AVALIAÇÃO DA
UMIDADE RELATIVA DE MADEIRA DE PINUS

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2017

JÉSSIMON FERREIRA

**SISTEMAS CAPACITIVOS APLICADOS NA AVALIAÇÃO DA
UMIDADE RELATIVA DE MADEIRA DE PINUS**

Dissertação apresentada como requisito parcial á obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, do Departamento de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tuset

PONTA GROSSA

2017

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa
n.02/18

F383 Ferreira, Jéssimon

Sistemas capacitivos aplicados na avaliação da umidade relativa de madeira de pinus. / Jéssimon Ferreira. 2017.
100 f.; il. 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Angelo Marcelo Tusset

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

1. Indústria madeireira. 2. Pinus elliottii. 3. Umidade. 4. Detectores. 5. Processamento de sinais. I. Tusset, Angelo Marcelo. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. III. Título.

CDD 621.3

Elson Heraldo Ribeiro Junior. CRB-9/1413. 24/01/2018.



Universidade Tecnológica Federal do
Paraná Campus de Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº 35/2017

SISTEMAS CAPACITIVOS APLICADOS NA AVALIAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DE MADEIRA DE PINUS

por

Jéssimon Ferreira

Esta dissertação foi apresentada às 9 horas do dia 20 de novembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA, com área de concentração em Controle e Processamento de Energia, linha de pesquisa em Instrumentação e Controle do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. José Manuel Balthazar
(UNESP)

Prof. Dr. Frederic Conrad Janzen
(UTFPR)

Pof. Dr. Max Mauro Dias Santos
(UTFPR)

Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tusset
Orientador

Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tusset
Coordenado do PPGEE

Dedico esse meu trabalho aos meu pais: José Ovande Ferreira e Emilia Ferreira. Meus irmãos Guinho, Dandi, Vandr  e Josi que junto ao senhor meu Deus nunca me desampararam. Dedico também aos meus filhos e filhas. Um dia vai dar tudo certo. Eu acredito.

AGRADECIMENTOS

Quando me propus a cursar o curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, eu já estava ciente das dificuldades que iria encontrar pela frente. Pois elas apareceram e junto apareceram grandes pessoas como o Luiz Farias, Fernando Emerenciano, David Carvalho, Regis Cardoso, Leandro Mota e Willian Kremes que por dois anos foram a minha família pois devido as circunstâncias eu me reunia mais com eles que a minha própria.

Agradeço a compreensão da minha esposa pais e irmãos pela ausência nesses dois anos pois a dedicação era indispensável.

Não posso deixar de agradecer ao professor Ângelo Marcelo Tusset que foi meu orientador. Mais do que orientador, foi humano, amigo e solidário em um momento mais difícil que eu encontrei nessa trajetória. O professor Ângelo é a minha inspiração nessa minha nova carreira profissional. A carreira de docente.

Meus agradecimentos aos professores: Max Mauro Dias Santos, Marcos Verges e Frederic Conrad Janzen e José Manoel Balthazar pelo apoio.

Não posso me esquecer do meu amigo Fábio Junior Alves Batista que me incentivou nesse projeto de vida.

RESUMO

FERREIRA, Jéssimon. **Sistemas capacitivos aplicados na avaliação da umidade relativa da madeira de pinus**. 2017. 100 f. Dissertação - (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

Este trabalho tem como propósito, caracterizar um sensor capaz de identificar o estado de umidade da madeira de Pinus da espécie Elliotti. O sensor projetado, foi implementado por duas placas metálicas de formato geométrico retangular formando um componente bipolar capacitivo. Para condicionar os sinais do sensor, foi implementado um circuito elétrico em ponte e integrado o sensor capacitivo nesse circuito elétrico que será alimentado por uma fonte de energia elétrica em corrente alternada (VCA) de alta frequência. O objetivo dessa integração, é obter nos ramos da ponte uma variação de sinal elétrico, em função da variação da reatância capacitiva entre as placas do sensor. A reatância capacitiva, é uma propriedade elétrica identificada na madeira quando essa atua como dielétrico entre as placas metálicas do sensor, e poderá sofrer variações em função da variação de umidade dos corpos de prova. Com a variação da reatância elétrica da madeira de pinus, foi possível registrar a variação da umidade dos corpos de prova tendo como parâmetro as variações dos sinais elétrico fornecidos pela ponte em função da reatância capacitiva. Para se obter os registros e realizar um método de comparação entre a umidade dos corpos de prova e sinal elétrico, os corpos de prova foram inicialmente saturados com água e durante um processo de secagem, foram coletados valores de leitura das grandezas elétrica envolvidas durante intervalos de tempos iguais até atingir o peso de massa seca. O diferencial desse trabalho em relação a outros do mesmo tema, é a sua capacidade de identificar em apenas uma ação, sem a utilização de processos destrutivos, pequenas áreas úmidas dentro de uma área de maior dimensão do material analisado. Os resultados obtidos, poderão ser visualizadas através de quadros, tabelas e gráficos.

Palavras-chave: Sensor capacitivo. Corpos de prova. Teor de umidade. Reatância capacitiva. Condicionamento e aquisição de sinais.

ABSTRACT

FERREIRA, Jéssimon. **Capacitive systems applied in the evaluation of the relative moisture of pinus woods**. 2017. 100 p. Dissertation (Master Degree in Electrical Engineering) - Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2017.

This work proposes to characterize a sensor able to identify the Pinus wood moisture status of the Elliotti species. The designed sensor was implemented by two metal plates of rectangular geometric shape forming a bipolar capacitive component. To conditionate the sensor signals, a bridged electric circuit has been implemented and the capacitive sensor integrated into this electrical circuit to be fed by a high frequency alternating current power source (VCA). The purpose of this integration is to obtain in the bridge's branches an electric signal variation, as a capacitive reactance variation function between the sensor plates. Capacitive reactance is an electrical property identified in the wood when it acts as a dielectric between the sensor metal plates, and may suffer variations depending on the sample humidity variation. With the Pinus wood electric reactance variation, it was possible to record the humidity variation of the samples having as a parameter the electric signals variations provided by the bridge as a capacitive reactance function. In order to obtain the records and perform a comparison method between the humidity of the samples tests and the electrical signal, the samples were initially saturated with water and during a drying process, and the values of the electrical quantities involved were collected during equal time periods, until reaching the dry mass weight. The differential of this work in relation to others of the same theme, is its ability to identify in only one action, without destructive processes usage, small humid spots within a larger area of the analyzed material. The obtained results can be visualized through tables, tables and graphs.

Keywords: Capacitive sensor. Test samples. Moisture content. Capacitive reactance. Conditioning and signal acquisition.

LISTA DE DESENHOS

| | |
|--|----|
| Desenho 1 - Medidas placas planas | 65 |
| Desenho 2 - Angulo de abertura da placa plana | 65 |
| Desenho 3 - Implementação do sensor capacitivo | 67 |
| Desenho 4 - Arte final do sensor capacitivo | 67 |
| Desenho 5 - Suporte do sensor capacitivo | 68 |
| Desenho 6 - Corpos de prova da madeira de Pinus Elliotte | 69 |
| Desenho 7 - Ponte em corrente alternada | 70 |
| Desenho 8 - Sistema de aquisição de dados. Integração Arduino e Matlab | 84 |
| Desenho 9 - Display LCD 16x2 caracteres | 90 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Medidor de Umidade para Madeira e Lâminas DUO 2070. | 22 |
| Figura 2 - Capacitor básico | 31 |
| Figura 3 - Campo elétrico E entre as placas de um capacitor | 33 |
| Figura 4 - Superfície gaussiana envolvendo a placa positiva | 34 |
| Figura 5 - Capacitor placas planas | 35 |
| Figura 6 - Linhas campo elétrico (efeito de borda) de um capacitor..... | 36 |
| Figura 7 - Capacitor de duas esferas | 36 |
| Figura 8 - Capacitor cilíndrico..... | 37 |
| Figura 9 - Representação de um capacitor com dielétrico | 42 |
| Figura 10 - Polarização das moléculas em um dielétrico | 43 |
| Figura 11 - Dielétrico submetido a tensões diferentes | 45 |
| Figura 12 - Superfície gaussiana e cargas induzidas | 47 |
| Figura 13 - Tipos de sinais elétricos..... | 49 |
| Figura 14 - Circuito RC típico | 51 |
| Figura 15 - Circuito integrado 555 | 58 |
| Figura 16 - Versão estável do CI555 | 59 |
| Figura 17 - Fluxo condicionamento de sinais | 61 |
| Figura 18 - Sistema em blocos de aquisição de dados. | 63 |
| Figura 19 - Terminal tipo olhal para conexão elétrica..... | 66 |
| Figura 20 - Medidor eletrônico..... | 70 |
| Figura 21 - Gerador de funções | 71 |
| Figura 22 - Osciloscópio Digital marca Minipa modelo MO-2061..... | 76 |
| Figura 23 - Representação em blocos do dispositivo capacitivo | 77 |

LISTA DE FOTOGRAFIAS

| | |
|--|----|
| Fotografia 1 - Estufa marca DELEO modelo DL-DED 42L..... | 73 |
| Fotografia 2 - Suporte para acomodação das peças de madeira..... | 74 |
| Fotografia 3 - Balança eletrônica de precisão. | 75 |
| Fotografia 4 - Placa Arduino modelo Uno | 83 |
| Fotografia 5 - Registro corpo de prova se em estado seco..... | 91 |
| Fotografia 6 - Variação de 2 g de água em relação ao estado seco | 92 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| Gráfico 1 - Desenvolvimento do gradiente de secagem..... | 28 |
| Gráfico 2 - Evolução da carga de um capacitor em função do tempo t. | 53 |
| Gráfico 3 - Curva de carga de um capacitor..... | 54 |
| Gráfico 4 - Corrente no capacitor durante a carga. | 55 |
| Gráfico 5 - Gráfico típico de carga e descarga de um capacitor..... | 57 |
| Gráfico 6 - Sinal elétrico de cada corpo de prova..... | 81 |
| Gráfico 7 - Gráfico da variação de tensão elétrica pelo peso de massa | 87 |
| Gráfico 8 - Variação do teor de umidade em função do peso de massa..... | 88 |
| Gráfico 9 - Variação do sinal elétrico em função do teor de umidade | 89 |
| Gráfico 10 - Gráfico do sinal elétrico corpo de prova úmido e seco | 97 |
| Gráfico 11 - Variação do sinal elétrico em função do teor de umidade | 98 |
| Gráfico 12 - Gráfico sinal elétrico para diferentes materiais | 100 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1- Modelo do registro dos valores coletados | 75 |
| Quadro 2 - Cores que identificam as leituras dos corpos de prova | 77 |
| Quadro 3 - Registros dos dados dos corpos de prova | 78 |
| Quadro 4 - Registros dos dados dos corpos de prova | 78 |
| Quadro 5 - Registros dos dados dos corpos de prova | 79 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Permissividade de alguns materiais | 45 |
| Tabela 2 Principais Características do aço inox 304 (Propriedades tipo:(ABNT – ASTM – AISI). | 64 |
| Tabela 3-Variação do teor de umidade após 6 horas de secagem | 79 |
| Tabela 4 - Amplitude do sinal em função do corpo de prova saturado..... | 80 |
| Tabela 6 - Resultados obtidos através do corpo de prova 1. | 85 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|------------|-------------------------------------|
| <i>A/D</i> | Analógico Digital |
| <i>CA</i> | Corrente Alternada |
| <i>CI</i> | Circuito Integrado |
| <i>CC</i> | Corrente Contínua |
| <i>ddp</i> | diferença de potencial |
| <i>PSF</i> | Ponto de saturação das fibras |
| <i>SI</i> | Sistema Internacional de Medidas |
| <i>Th</i> | Tempo de sinal elétrico nível alto |
| <i>Tl</i> | Tempo de sinal elétrico nível baixo |
| <i>USA</i> | Unidade de saturação do ar |
| <i>VCA</i> | Tensão Corrente Alternada |
| <i>VCC</i> | Tensão Corrente Contínua |

LISTA DE SIMBOLOS

| | |
|-----------------|--|
| f | Frequência de um sinal |
| T | Período de um sinal |
| t | Tempo |
| τ | Tal |
| V | Tensão elétrica |
| V_e | Tensão elétrica de entrada de um circuito |
| V_c | Tensão elétrica de um capacitor |
| i | Corrente elétrica |
| R | Resistência elétrica |
| ε_0 | Constante dielétrica do vácuo |
| ε_r | Constante dielétrica de um material qualquer |
| ε | Constante dielétrica absoluta |
| C | Capacitância |
| E | Campo elétrico |
| q_0 | Carga inicial de um capacitor |
| Q | Valor absoluto de uma carga elétrica |
| $U\%$ | Porcentagem de umidade da madeira saturada |
| $u\%$ | Porcentagem de umidade da madeira seca |
| P_u | Peso umido da madeira |
| P_s | Peso seco da madeira |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 OBJETIVOS | 18 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 18 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 18 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 19 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 2.1 TIPOS DE ÁGUA E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA..... | 21 |
| 2.2 IMPORTÂNCIA E RAZÕES PARA A SECAGEM DA MADEIRA | 23 |
| 2.3 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SECAGEM E GRADIENTES DE UMIDADE..... | 24 |
| 2.4 TEORIA DOS CAPACITORES..... | 30 |
| 2.4.1 Capacitores Planos | 35 |
| 2.4.2 Capacitores Esférico | 36 |
| 2.4.3 Capacitores Cilíndricos..... | 37 |
| 2.4.4 Densidade de Energia | 37 |
| 2.4.5 Capacitância..... | 38 |
| 2.5 DIELETRICO E CONSTANTE DIELETRICA | 41 |
| 2.5.1 Dielétricos e a Lei de Gaus | 46 |
| 2.6 SENSORES CAPACITIVOS | 48 |
| 2.6.1 MÉTODOS PARA LEITURA DE CAPACITÂNCIA..... | 50 |
| 2.6.2 Carga e Descarga de um capacitor em um circuito RC..... | 50 |
| 2.6.3 Descarga de um capacitor..... | 56 |
| 2.6.4 Circuitos Osciladores..... | 57 |
| 2.6.5 Pontes de Medidas Elétrica..... | 60 |
| 2.6.6 Sistemas de Condicionamento e Aquisição de sinais | 60 |
| 3 DESENVOLVIMENTO | 64 |
| 3.1 IMPLEMENTAÇÃO DO SENSOR CAPACITIVO | 64 |
| 3.1.1 Placas planas | 64 |
| 3.1.2 Cabos para conexão elétrica | 65 |
| 3.1.3 Caracterização Física do Sensor | 66 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 68 |
| 4.1 MATERIAIS | 68 |
| 4.1.1 Sistema de Ensaio | 68 |
| 4.1.2 Confecção dos Corpos de Prova..... | 69 |
| 4.1.3 Dispositivo Auxiliar de Comparação..... | 69 |
| 4.1.4 Condicionamento de Sinais..... | 70 |
| 4.1.5 Gerador de Sinais | 71 |
| 4.2 METODOS | 72 |
| 4.2.1 Processo de Secagem dos Corpos de prova | 72 |

| | |
|--|-----------|
| 5 COLETA DE DADOS..... | 76 |
| 5.1 OSCILOSCÓPIO | 76 |
| 5.2 INTEGRAÇÃO ARDUINO MATLAB | 81 |
| 5.2.1 Placa Eletrônica Arduíno | 82 |
| 5.2.2 Monitoramento dos dados aquisitados | 83 |
| 5.2.3 Registro dos dados aquisitados | 84 |
| 5.3 INTEGRAÇÃO ARDUINO DISPLAY LCD | 89 |
| 5.3.1 Método de calibração do sistema | 90 |
| 5 CONCLUSÕES E MELHORIAS FUTURAS | 93 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 94 |
| ANEXOS A - RESULTADOS OBTIDOS APLICANDO ÁGUA EM DIFERENTES ÁREAS DOS CORPOS DE PROVA..... | 96 |
| ANEXO B - RESULTADOS EXPERIMENTAIS..... | 98 |

1 INTRODUÇÃO

Diversos são os materiais utilizados pelo homem nas suas mais variadas necessidades de bem estar. Dentre os principais materiais, como o metal, a borracha, o plástico e o vidro, a madeira tem uma posição de destaque devido a sua variabilidade natural, como também pelas características estéticas que ela pode produzir, permitindo sua utilização em variada gama de aplicações e ambientes (JANKOWSKY; GALINA, 2013).

Com a crescente demanda de madeira para fins madeireiros e energéticos e ainda o interesse sobre a fixação de carbono, formalizado a partir do Protocolo de Kyoto, e pela implementação do mercado de commodities ambientais, faz com que as avaliações que ampliam os conhecimentos sobre as características tecnológicas da madeira, torne-se cada vez mais como aspecto prioritário para o melhor uso desta matéria prima. Não diferente a outros materiais, a madeira possui propriedades que são objetos de estudos cujo objetivo, é diminuir as perdas de insumos nos processos de beneficiamento e aumentar a qualidade do produto final.

As propriedades identificadas da madeira são: Propriedade organolépticas, massa específica (densidade), umidade, contração e inchamento, térmicas, elétrica, acústica e mecânica (MORESCHI, 2012).

Nas florestas plantadas, geralmente as variáveis de maior interesse econômico comercial são: a determinação do peso seco da matéria e a densidade básica madeira (no tronco) produzida por unidade de área em um determinado período de tempo e o seu teor de umidade.

As vantagens de se determinar e controlar o teor de umidade das madeiras tem influência nos custos de acabamento final e nos transportes com a diminuição do peso (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985), além de ser uma pré condição para se utiliza-la de maneira racional uma vez que ela afeta as mais importantes propriedades desse material (RODRIGUES, 1999).

Esse trabalho terá como foco, determinar o estado seco ou úmido da madeira através da sua propriedade elétrica. Mais precisamente, através da sua reatância capacitiva, onde será implementado um dispositivo composto por um sistema de condicionamento e aquisição de sinais que irá identificar a variável tensão elétrica utilizando-se do método de comparação capacitiva.

A madeira escolhida para a confecção dos corpos de prova, é da espécie do Pinus Elliotti coletado em uma serraria que adquire toras dessa madeira já em fase adulta. As madeiras de Pinus, são originárias de uma floresta plantada localizada no município Telêmaco Borba nos Campos Gerais do estado do Paraná, á 235 Km da capital paranaense Curitiba. O Pinus Elliotti é uma árvore nativa dos Estados Unidos e no Brasil, o seu plantio garante a produção de resina, celulose, papel, madeira serrada, madeira laminada, confecção de painéis, molduras entre outras aplicações. Para a produção de madeiras de qualidade o corte de Pinus é realizado entre o 20-25 anos após o plantio (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005).

A conversão de Pinus em madeira serrada teve início no fim da década de 70, quando começaram os desbastes nas florestas plantadas com os incentivos fiscais (CELSO FOELKEL, 2005). Até então o mercado era suprido pelas madeiras de araucárias ainda abundante. A madeira de Pinus era considerada de baixo custo e supria o mercado.

A madeira de Pinus recém cortada, contém grande quantidade de água e que além de aumentar o peso da madeira impede que ela seja colada, lixada, envernizada ou pintada adequadamente (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Implementar um dispositivo capacitivo, capaz de identificar o teor de umidade em madeiras de Pinus laminada em função das suas propriedades elétricas durante um processo de secagem.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter através das literaturas existentes, expressões matemáticas que permitam determinar o teor de umidade dos corpos de prova quando se encontrarem na fase saturada e seca;

- Projetar e implementar um sensor capacitivo com capacidade de obter leituras de variações elétrica em função da reatância capacitiva dos corpos de prova;
- Implementar um sistema de condicionamento e aquisição de sinais para ser integrado ao sensor capacitivo de forma a ser entrada em um sistema computacional;
- Implementar através dos dados obtidos com o sensor capacitivo, gráficos e tabelas para análises comparativas entre os sinais elétrico e o teor de umidade dos corpos de prova.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para a medição do teor de umidade em madeiras, vários métodos são utilizados sendo os mais comuns: Método por pesagens (mais usuais), Métodos químicos por destilação e por titulação (mais precisos) e Métodos que utilizam aparelhos elétricos (mais práticos e rápidos), (MORESCHI, 2012).

A coleta de amostras para o método de pesagens, é considerado um método eficiente porém destrutivo, trabalhoso e que requer paradas no sistema produtivo. O método químico é um modo mais eficiente de se conhecer o teor de água porém sua utilização possui os seguintes inconveniente:

- Necessidade de laboratório adequado e pessoal técnico idôneo;
- Necessidade de vidraria de laboratório frágil e custosa;
- Emprego de solventes custosos;
- Escapamento de vapores insalubres e facilmente inflamáveis.

Os medidores elétricos são baseados na resistência que a madeira oferece a passagem da corrente contínua ou na sua capacidade elétrica. Os medidores elétricos, também podem ser considerado eficiente porém pode requer paradas ou diminuição da velocidade das linhas de produção para que seja possível a coleta de dados.

O sensor capacitivo proposto, será um dispositivo elétrico que pode ser inserido em uma linha de produção e coletar dados relacionados as propriedades elétrica da madeira, sem se utilizar de um processo destrutivo e também sem necessitar que se

pare os equipamentos de transportes da madeira para registrar os dados coletados pelo sensor e verificar o nível de umidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TIPOS DE ÁGUA E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA

A água e os sais minerais que as árvores absorvem circula pelos vasos da planta e deslocam-se até as folhas, constituindo a seiva bruta (JANKOWSKY; GALINA, 2013). Das folhas em direção às raízes circula a seiva elaborada, que além de substâncias elaboradas na fotossíntese é constituída de água, a qual é conduzida pelas células, que tem como tarefa básica a condução da água, a estocagem de produtos e o suporte físico da planta (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985). Em algumas arvores, como as folhosas, há uma célula específica para cada uma dessas funções.

A água se encontra de três formas distintas na madeira: água de constituição, água de impregnação e água livre (MORESCHI, 2005). A água de constituição faz parte da constituição química da madeira, e só é eliminada pela destruição da mesma. A água de impregnação localiza-se no interior das células, entre as microfibras que formam a celulose. A água livre se localiza nos espaços vazios entre as células, nos vasos e poros, circulando livremente, que é de fácil remoção e não modifica o estado físico da madeira após ser retirada. Assim, ao secar uma madeira cortada, a primeira água a sair é a água livre. Ao acabar a água livre começa a sair a água de impregnação. Esse é o chamado Ponto de Saturação das Fibras (PSF) (MORESCHI, 2005).

O teor de umidade, é o resultado da relação entre o peso da água contida na madeira e o peso desta madeira realmente seca. O resultado do teor de umidade da madeira é geralmente expresso em porcentagem. O método para se determinar o teor de umidade inicial de uma madeira consiste em: determinar o peso da amostra da madeira úmida; coloca-se a amostra em uma estufa com temperatura aproximada de 103°C até que seu peso se torne constante (JANKOWSKY; GALINA, 2013); Calcula-se a umidade inicial aplicando a Equação 1 abaixo (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

$$U\% = \left(\frac{P_u - P_s}{P_s} \right) 100 \quad (1)$$

Onde:

$U(\%)$ = Teor de umidade em porcentagem.

P_u = Peso úmido da amostra.

P_s = Peso seco da amostra.

O método mais prático de verificar a umidade da madeira, é o uso de aparelhos medidores eletrônicos. O mais comum possui um eletrodo usualmente com duas ou quatro pontas, medindo a resistência elétrica entre estas pontas quando cravadas na madeira, dando diretamente como leitura a umidade da madeira. A Figura 1, nos apresenta um modelo de leitor eletrônico para leitura de umidade em madeiras pelo método de resistividade (Ω).

Figura 1 - Medidor de Umidade para Madeira e Lâminas DUO 2070.



Fonte: <http://www.insmart.com.br>.

2.2 IMPORTÂNCIA E RAZÕES PARA A SECAGEM DA MADEIRA

Todo tipo de madeira, após serem cortadas, apresenta alto teor de umidade, que tende a reduzir-se espontânea e lentamente à medida que as toras aguardam o seu processamento. Após o desdobro, a umidade continua a diminuir com maior ou menor rapidez em função da espécie, das condições ambientais, das dimensões das peças e do empilhamento utilizado. Na maioria das vezes, o processamento final só deve ser efetuado quando a umidade atingir valores inferiores a 30% (TSOUMIS, 1991).

Algumas espécie de madeira secam mais rapidamente que outras, em função da sua estrutura anatômica. Outras, possuem vasos e/ou traqueídeos mais largos e abertos ou mais abundantes, favorecendo com isso, a circulação da umidade no seu interior e, conseqüentemente, a sua secagem. Madeiras de coníferas, por exemplo, precisam, normalmente, de menos tempo para secar, do que madeiras de folhosas.

A massa específica da madeira serve como indicativo para a sua velocidade de secagem. Madeiras com maior massa específica, levam mais tempo para secar e vice-versa. Peças com maior quantidade de albúrnio em geral secam mais rapidamente do que as com maior quantidade de cerne. Peças de madeira que possuam anéis de crescimento mais largos e ricos em lenho primaveril, apresentam maior velocidade de secagem do que a mesma espécie com anéis de crescimento finos e ricos em lenho juvenil.

Uma determinada espécie de madeira poderá apresentar diferentes velocidades de secagem ou diferentes tempos de secagem. Estas diferenças estão em função do teor de umidade inicial das peças a serem secas. Uma peça com teor de umidade inicial baixo levará um menor tempo para secar em relação a outra com um teor de umidade inicial mais elevado.

Também deve-se salientar que a perda de água reduz o peso da madeira, diminuindo o custo do seu transporte, mas, independente deste fator econômico, a transformação racional da madeira bruta em produtos e bens de consumo requer a sua secagem pelas razões seguintes:

- Reduz a movimentação dimensional a limites aceitáveis. Como consequência, as peças de madeira podem ser produzidas com maior precisão de dimensões, proporcionando melhor desempenho em serviço;

- Melhora a atuação de colas, vernizes e tintas aplicadas sobre a madeira;
- Reduz os riscos do ataque de fungos apodrecedores e manchadores;
- Proporciona melhor qualidade das juntas de colagem;
- Propicia maior impregnação da madeira com líquidos preservativos e ignífugos;
- Aumenta a resistência mecânica.

O teor de água da madeira influi, acentuadamente, nas suas propriedades físico mecânicas. A resistência da madeira, de uma maneira geral, decresce com o aumento da sua umidade. A resistência elétrica da madeira também é inversamente proporcional ao seu teor de água, sendo que, de 30% até 0% de umidade a resistência aumenta cerca de 1 milhão de vezes.

A variação do teor de umidade ocasiona alterações nas dimensões da madeira. Esse fenômeno é denominado de retração e inchamento higroscópico, porque as alterações volumétricas ocorrem como consequência de variações no teor de água higroscópica.

De modo geral, os produtos de madeira industrializados devem ser condicionados a umidades próximas das que deverão alcançar em seu uso.

2.3 PROCESSO DE SECAGEM E GRADIENTES DE UMIDADE

Quando uma peça de madeira verde é exposta a condições normais do ambiente, as fibras da superfície tendem a atingir a umidade de equilíbrio com o ar ao seu redor. Existindo circulação de ar, que possibilite remover a água que continua a chegar à superfície, estabelece-se o movimento capilar de água do interior para o exterior da peça. Nessas condições, a rapidez de secagem dependerá, inicialmente, velocidade do ar e da sua capacidade em receber o vapor d'água retirado da madeira.

Existindo condições ambientais adequadas, que permitam a evaporação da água da superfície, as forças capilares determinam a movimentação inicial da água do interior para o exterior da madeira, que passa a mover-se por difusão quando o teor de umidade cai abaixo da umidade de saturação do ar. Como se pode deduzir, em uma mesma peça pode ocorrer simultaneamente movimentação por capilaridade e difusão.

A remoção da água da superfície é assegurada, nos secadores, pela circulação forçada de ar, que possibilita também a transferência de calor do sistema de aquecimento para a madeira. A influência da velocidade de circulação do ar decresce com a redução da umidade. A movimentação da água do interior para a superfície, por outro lado, depende da temperatura, permeabilidade, densidade da madeira, espessura das peças e gradientes de umidade.

Há, no processo de secagem, uma fase em que a quantidade da água capilar transferida para a superfície é menor que a quantidade de água que se evapora da superfície. Nessas condições, o teor de umidade superficial diminui para valores inferiores à umidade de saturação do ar. Estabelece-se, assim, um gradiente de umidade que origina as forças que movem a água abaixo da umidade de saturação ao ar.

Da primeira lei de Fick, pode-se inferir que o fluxo de umidade na madeira é proporcional ao gradiente de umidade como apresentado na Equação 2.

$$\frac{m}{tA} = k \frac{\Delta u}{e} \quad (2)$$

Onde:

m = massa de água movimentando-se através da peça de madeira;

e = espessura da madeira;

t = tempo;

A = área perpendicular a direção do fluxo considerado;

k = coeficiente de difusão

Δu = diferença do teor de umidade entre as duas superfícies consideradas da peça.

Como os gradientes variam com a permeabilidade da madeira e com o período de tempo de secagem, é conveniente verificar as suas características em diferentes situações.

Considera-se inicialmente, o relacionamento do gradiente com a permeabilidade. Para madeira de reduzida permeabilidade onde não há continuidade de capilares, o teor de umidade da superfície ficará imediatamente abaixo da umidade de saturação do ar, aproximando-se rapidamente da umidade de equilíbrio, enquanto a umidade interior é ainda bastante elevada.

É fato conhecido que a madeira se movimenta ou trabalha, isto é, retrai ou incha de acordo com a umidade relativa ambiental.

As inúmeras implicações de ordem prática do fenômeno fazem o seu estudo de grande importância. Espécies podem ser vetadas em utilizações onde a estabilidade dimensional seja fator importante. Por outro lado, o estudo das características da movimentação da madeira tem permitido o aproveitamento de espécies menos estáveis, para obter produtos de alta estabilidade como compensados.

De uma maneira geral, à medida que a madeira perde água ela se retrai, ao passo que o inchamento caracteriza a absorção. Praticamente, toda a movimentação ocorre entre a umidade de saturação ao ar e 0% de umidade. Isso significa que as variações dimensionais correspondem à dessorção ou adsorção da água higroscópica localizada nas paredes celulares.

Convém, separar os fatores relacionados com a evaporação ou remoção da umidade superficial daqueles que dizem respeito à difusão da água higroscópica.

Considere-se que, a rapidez da secagem (r_s) pode ser expressa pela relação entre a redução do teor de umidade (Δu) na madeira em secagem e o período de tempo (Δt) decorrido para essa redução como apresentado na Equação 3.

$$r_s = \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (3)$$

Para definirmos o teor de umidade da madeira após essa passar por um processo de secagem utilizamos a Equação 4.

$$u_{\%} = \frac{P_s (U_{\%} + 100)}{P_u} - 100 \quad (4)$$

Onde:

$u_{\%}$ = Teor de umidade final;

$U_{\%}$ = Teor de umidade inicial;

P_s = Peso seco;

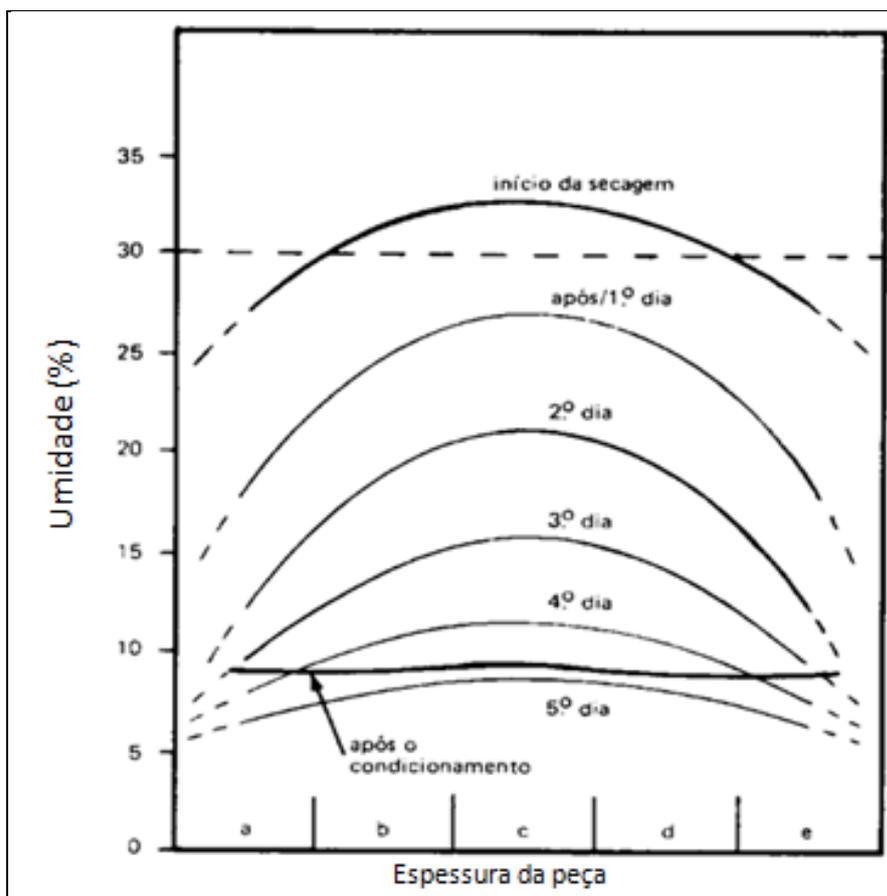
P_u = Peso úmido.

Assim, podemos também identificar r_s se apresenta na Equação 5.

$$r_s = \frac{P_a}{tP_s} \quad (5)$$

Essa conceituação permite estabelecer que madeiras mais densas requerem maior período de secagem que madeiras de menor densidade com as mesmas dimensões. Isso porque, aumentando o peso seco (P_s), em consequência da maior densidade, maior massa de água deverá ser removida para igual redução da umidade (u) como ilustra o Gráfico 1.

Gráfico 1 - Desenvolvimento do gradiente de secagem.



Fonte: Adaptado (Fernandes & Galvão (1988)).

Exemplificando, para se diminuir em 20% a umidade de 1 metro cúbico de madeira com densidade de 0,35, será necessário retirar 70 kg de água, ao passo que, se a madeira tiver 0,80 de densidade, a quantidade de água a ser retirada será 160 kg.

A evaporação da água da superfície da madeira e portanto, a rapidez de secagem (r_s), dependem da umidade relativa do ambiente e da velocidade de circulação do ar. A umidade relativa determina a capacidade do ambiente em receber água removida da madeira. Da mesma forma, a circulação inadequada do ar pode limitar a remoção de moléculas de água da superfície para o ambiente. Experimentos demonstram que a influencia da velocidade é mais acentuada nos estágios iniciais da secagem e com a madeira mais úmida.

Assim, a rapidez de secagem, naquilo que é exclusivamente afetada pela remoção de água de superfície é indiretamente proporcional à densidade, indiretamente proporcional à espessura, indiretamente proporcional a umidade

relativa, e indiretamente proporcional à velocidade de circulação do ar (dentro de certos limites).

A rapidez de secagem depende também da taxa de difusão da água higroscópica. Isto é, da movimentação da água das camadas interiores mais úmidas para as exteriores mais secas. Entretanto, a rapidez de difusão depende também da densidade e espessura da madeira. Maior quantidade de parede celular, tem de ser atravessada pelas moléculas de água para atingir a superfície de madeiras mais densas e de peças mais espessas.

A temperatura também está diretamente relacionada à rapidez de secagem, conforme mostram dados experimentais. A utilização de maiores temperaturas implica no fornecimento de maior quantidade de energia para as moléculas de água em menor período de tempo.

Abaixo da USA (umidade de saturação do ar), o gradiente de umidade está diretamente relacionado à rapidez de secagem. Ele origina as forças que movem a água higroscópica. A diminuição do gradiente, no tempo, reduz a rapidez de secagem à medida que esta se desenvolve.

A permeabilidade é outro fator que influencia a rapidez de secagem, principalmente na fase de remoção da água capilar.

Resta apenas considerar o efeito da umidade inicial da madeira na rapidez de secagem, que pode apresentar duas situações distintas:

a) em madeiras regularmente permeáveis. que apresentam gradiente de umidade parabólico durante toda a secagem, o período total de tempo de secagem independe da umidade inicial:

b) quando há limitações para a remoção da água superficial, ou a madeira é impermeável, o período de tempo de secagem depende da umidade inicial.

Segundo as afirmações de Jankowsky & Galvão (1984), a secagem da madeira é um balanço dinâmico entre a transferência de calor da corrente de ar para a madeira, a evaporação superficial da madeira, a difusão de umidade através da madeira e o fluxo de água capilar na madeira. A compreensão dos efeitos divergentes que diferentes fatores tenham sobre este fenômeno constitui a tecnologia da secagem da madeira.

Para considerar uma estimativa do período de tempo de secagem inicialmente deve-se considerar que, os diferentes métodos existentes para avaliar o tempo de secagem apenas servem como referencia, pois há possibilidade de ocorrerem grandes diferenças em função da variação da madeira, do equipamento e da qualidade requerida.

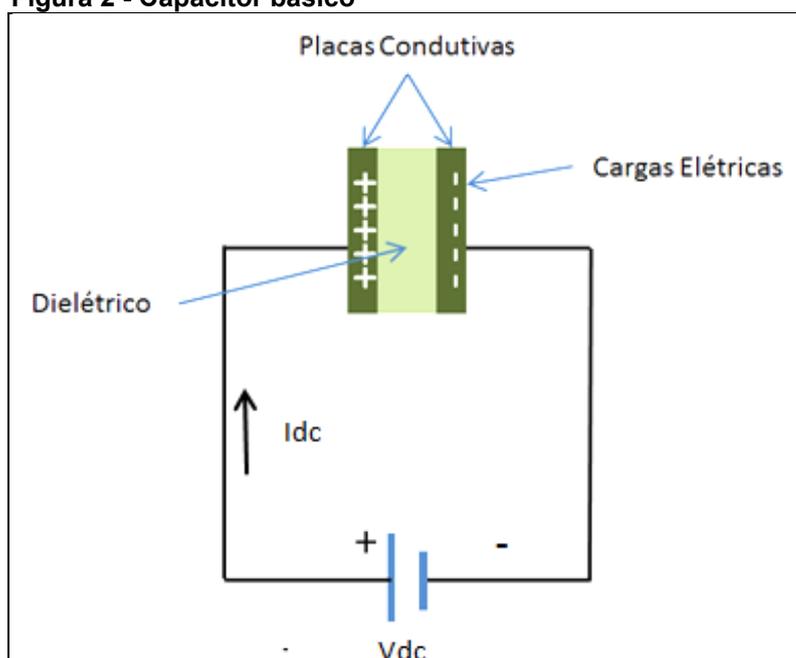
2.4 TEORIA DOS CAPACITORES

Capacitores são dispositivos que armazenam energia potencial elétrica e carga elétrica (SEARS, 2004). Basicamente são compostos por duas peças metálicas chamadas placas e um material isolante entre elas com propriedades específicas chamado dielétrico. As placas ao serem eletrizadas, armazenam cargas elétrica de mesmo valor absoluto, porém de sinais contrários.

Nos dispositivos de origem elétrica, os capacitores possuem infindáveis aplicações. Alguns capacitores são usados para armazenar energia, mas a maioria é usada para filtrar frequências elétricas indesejadas (TIPLER; MOSCA, 2009).

Quando as placas metálicas estão eletricamente neutras, dizemos que o capacitor está descarregado. Uma forma de carregar um capacitor com energia potencial elétrica é conectá-lo a uma fonte de energia CA ou CC. A Figura 2, mostra o arranjo de um capacitor básico onde podemos visualizar duas placas metálicas retangulares planas e paralelas entre si, de espessura desprezível, de dimensões e distancia entre elas definidas, isoladas entre si por um material dielétrico, sendo alimentadas por uma fonte de tensão elétrica.

Figura 2 - Capacitor básico



Fonte: Autoria própria

Experimentalmente, poderíamos implementar um capacitor utilizando como base teórica a Figura 3. Por ser uma forma construtiva básica, o dielétrico entre as placas metálicas pode ser o próprio ar ou o vácuo como é designado em algumas literaturas. Conectando as placas metálicas a uma ddp de uma bateria, poderíamos observar através de instrumentos específicos de leitura, a circulação de uma corrente elétrica entre as placas. Essa corrente elétrica, é resultado da soma de outras correntes elétricas que são conhecidas como:

- Corrente capacitiva (I_c);
- Corrente elétrica de absorção (I_{ab});
- Corrente elétrica resistiva ou corrente elétrica de condução (I_{cd}).

A origem da corrente elétrica se dá por uma transferência de elétrons de uma das placas inicialmente descarregadas para serem depositados na outra placa, até que adquirissem a tensão da bateria (em um circuito elétrico a movimentação de elétrons recebe o nome de corrente elétrica); diz-se então que as placas estão carregadas com cargas $+q$ e $-q$ com um valor absoluto Q . No instante em que as placas estão sendo carregadas, é produzido entre elas um campo elétrico que é uma propriedade elétrica de grande influência no armazenamento de energia potencial elétrica.

O campo elétrico que essa transferência produz no espaço entre as placas tem um sentido tal que se opõem a novas transferências de cargas sendo necessário um trabalho maior para transferência de novos elétrons (HALLIDAY, 2009).

A energia potencial elétrica armazenada em um capacitor carregado é exatamente igual ao trabalho realizado para carregá-lo (SEARS, 2004). Como esse trabalho é armazenado na forma de energia potencial U do capacitor temos a Equação 6 para o cálculo da energia potencial onde: C é o valor de capacitância.

$$U = \frac{q^2}{2C} \quad (6)$$

O campo elétrico em qualquer ponto da região entre os condutores é proporcional ao módulo Q carga em cada condutor (SEARS, 2004) onde podemos concluir que a ddp entre as placas condutoras também é proporcional a Q como podemos visualizar na Equação 7 onde: C é a propriedade elétrica de armazenar energia e V representa a ddp em volts.

$$Q = C * V \quad (7)$$

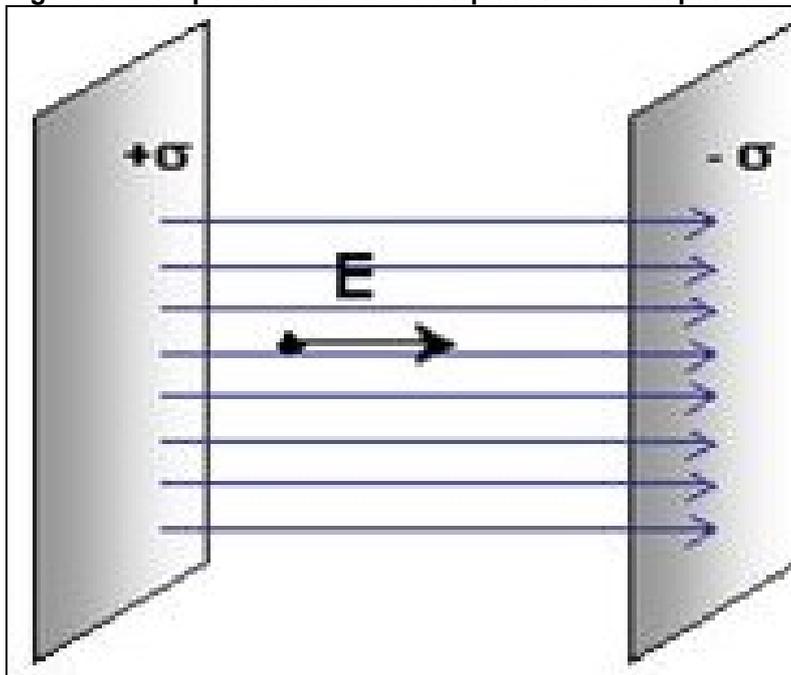
Analisando a Equação 02 podemos calcular U utilizando a equação que define a carga de um capacitor, como ilustrado na Equação 8.

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (8)$$

Ao dobrarmos o módulo de carga de cada condutor, a densidade de carga, o campo elétrico e a ddp entre os condutores também dobram, contudo, a razão entre carga e a ddp não varia.

O campo elétrico entre as placas, é produzido durante o processo de carga de um capacitor. Como podemos visualizar na Figura 3, as linhas do campo elétrico E estão igualmente espaçadas entre as placas, indicando que o campo elétrico é uniforme.

Figura 3 - Campo elétrico E entre as placas de um capacitor



Fonte: Adaptado (TIPLER; MOSCA, 2009)

Para carregar um capacitor é preciso estabelecer o campo elétrico entre as placas, ou seja a energia armazenada no capacitor é a energia armazenada no campo elétrico e denominada energia elétrica do campo eletroestático.

Para relacionar o campo elétrico \vec{E} entre as placas de um capacitor à carga q de uma das placas, usamos a lei de *Gauss* representada na Equação 9 onde q é a carga envolvida por uma superfície *gaussiana* e $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A}$ é o fluxo elétrico que atravessa a superfície (TIPLER; MOSCA, 2009).

$$\epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q \quad (9)$$

Sempre que existe um fluxo, \vec{E} tem um módulo constante E e os vetores \vec{E} e $d\vec{A}$ são paralelos. Nesse caso a Equação 04 se resume na Equação 10 onde A é a área da parte da superfície gaussiana através da qual existe um fluxo.

$$q = \epsilon_0 * E * A \quad (10)$$

É possível calcular a ddp entre as placas de um capacitor relacionando o campo elétrico \vec{E} através da Equação 11.

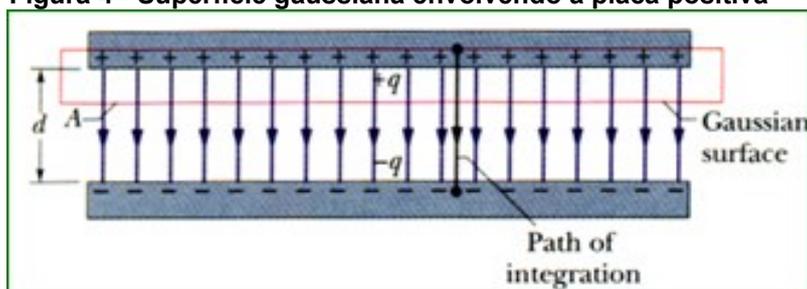
$$V_f - V_i = - \int_i^f \vec{E} * d\vec{s} \quad (11)$$

A integral é calculada ao longo de uma trajetória começando em uma das placas e terminando em outra, coincidindo sempre com uma linha do campo elétrico, da placa negativa até a placa positiva. Nessa trajetória os vetores \vec{E} e $d\vec{s}$ tem sentidos opostos e, portanto o produto $\vec{E} * d\vec{s}$ é igual a $-E * ds$. Chamando de V (tensão elétrica) a diferença $V_f - V_i$ a Equação 06 assume a forma com mostrado na Equação 12.

$$V = \int_+^- E * ds \quad (12)$$

A Figura 4 ilustra um capacitor de placas planas onde por conveniência a superfície gaussiana envolve totalmente a carga da placa positiva.

Figura 4 - Superfície gaussiana envolvendo a placa positiva



Fonte: Adaptado (HALLIDAY, 2009)

A lei de Gauss é válida para qualquer distribuição de cargas e para qualquer superfície fechada (SEARS, 2004).

Para que haja um campo elétrico uniforme é necessário que haja uma interação específica, limitando os possíveis formatos geométricos de um capacitor, assim alguns exemplos de capacitores são:

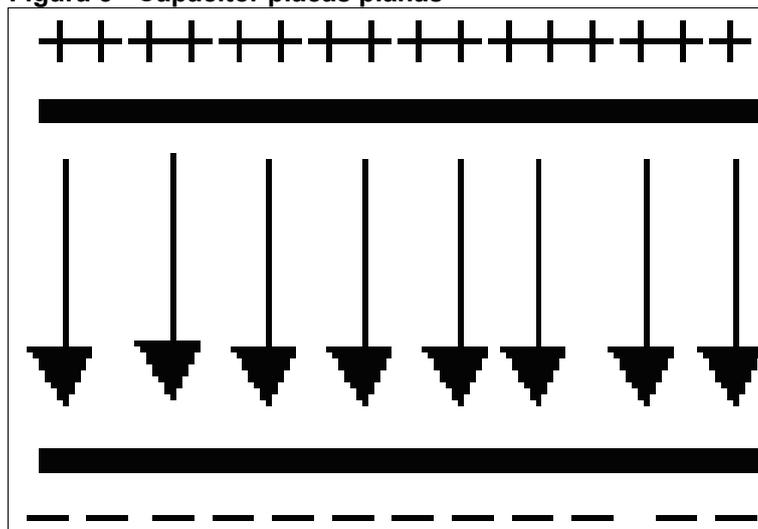
- a) Planos;
- b) Esféricos;

c) Cilíndricos.

2.4.1 Capacitores Planos

O capacitor plano é formado por placas condutoras planas e carregadas com cargas Q^+ e Q^- . Essas cargas se atraem e se distribuem uniformemente nas superfícies internas das placas (TIPLER; MOSCA, 2009). Se a distância d entre elas é muito menor que as dimensões das placas, podemos tratá-las como se fossem planos infinitos, desprezando os "efeitos de beirada" nas bordas dos planos (NUSSENZVEIG, 1997). A Figura 5, nos apresenta um capacitor plano. Importante observar, que as linhas de campo são idênticas em toda a extensão do capacitor, porque estamos desprezando os efeitos de borda.

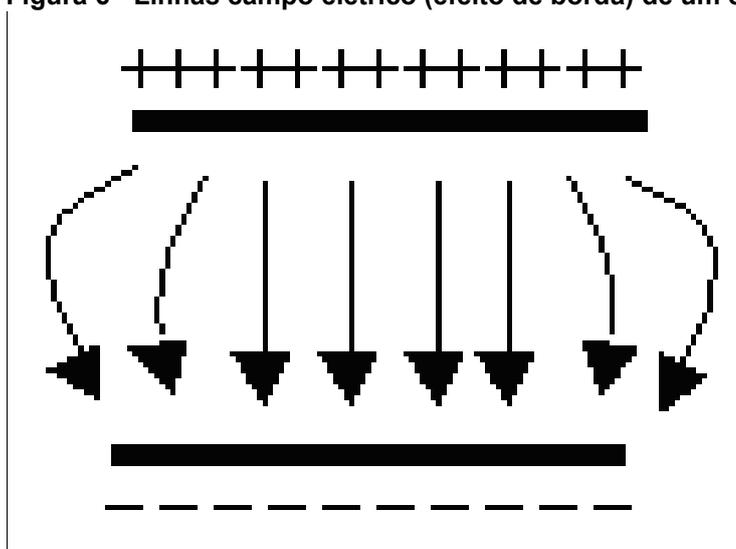
Figura 5 - Capacitor placas planas



Fonte: Autoria própria

Na Figura 6, podemos compreender melhor o efeito de borda. O campo elétrico se estende a um volume além das bordas das placas e como citado acima essa atenuação pode ser obtida diminuindo a distância d (m) entre as placas.

Figura 6 - Linhas campo elétrico (efeito de borda) de um capacitor

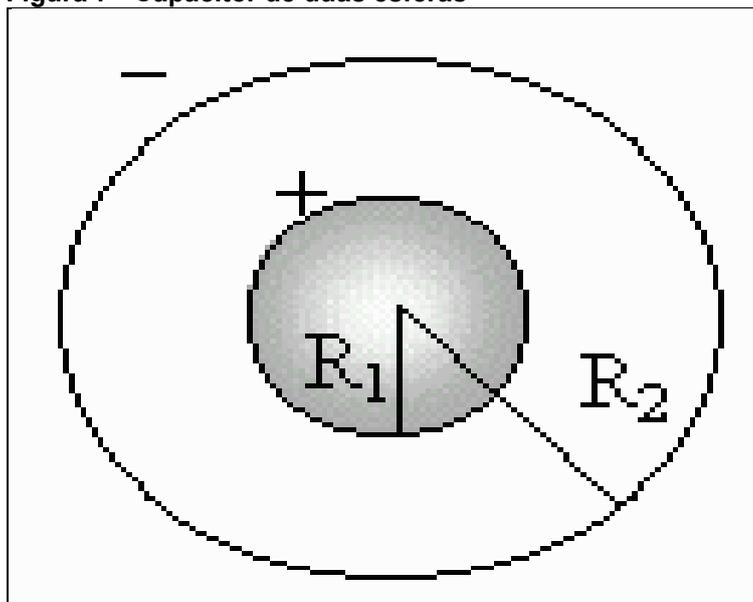


Fonte: Autoria própria

2.4.2 Capacitores Esférico

É formado por um par de esferas condutoras concêntricas de raios R_1 e R_2 como podemos visualizar na Figura 7, que nos apresenta duas esferas separadas pelo vácuo. A esfera interna possui carga $+Q$ e raio R_1 e a esfera externa possui carga $-Q$ e raio R_2 . Para encontrar o campo elétrico entre os condutores é utilizada a lei de *Gauss* e a partir disso podemos determinar a ddp entre os condutores.

Figura 7 - Capacitor de duas esferas

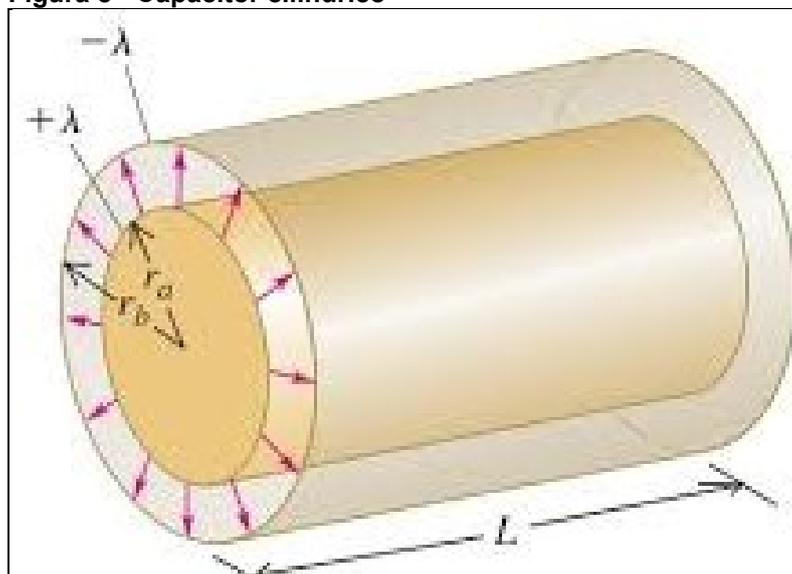


Fonte: Adaptado, (NUSSENZVEIG, 1997)

2.4.3 Capacitores Cilíndricos

A capacitância de cilindros coaxiais é determinada inteiramente pelas dimensões, tal como o capacitor paralelo. A Figura 8, nos apresenta a imagem de um capacitor cilíndrico de comprimento L (m) e raios a (radiano) e b (radiano), onde o cilindro interno está carregado com carga $+q$, enquanto o externo está carregado com carga $-q$.

Figura 8 - Capacitor cilíndrico



Fonte: (SEARS, 2004)

Para calcular a capacitância, é necessário estabelecer a relação entre potencial e carga, e com a lei de Gauss podemos obter o campo elétrico entre os cilindros.

2.4.4 Densidade de Energia

A partir das energias acumuladas em um campo elétrico, é possível calcular as respectivas densidades de energia, isto é, energia por unidade de volume. Como esse campo elétrico ocupa certo volume no espaço (dependendo da geometria do capacitor), podemos concluir que deve haver uma densidade de energia por unidade de volume no espaço entre as placas do capacitor. Desprezando o efeito das bordas em um capacitor de placas planas por exemplo, o campo elétrico tem o mesmo valor em todos os pontos situados entre as placas. Assim a densidade de energia μ , ou seja a energia potencial por unidade de volume no espaço entre as placas, também é

uniforme (NUSSENZVEIG, 1997). De acordo com a Equação 13, podemos calcular μ dividindo a energia potencial total pelo volume Ad onde: A é a área da placa condutora e d é a distância entre elas.

$$\mu = \frac{U}{Ad} \quad (13)$$

Se substituirmos U pela sua equação apresentada na Equação 13 teremos a Equação 14 para calcular a densidade e energia.

$$\mu = \frac{CV^2}{2Ad} \quad (14)$$

2.4.5 Capacitância

A grandeza elétrica que define a capacidade de armazenamento de energia de um capacitor é chamada de capacitância. É uma medida da capacidade de armazenar carga para uma dada diferença de potencial. A carga elétrica armazenada em um capacitor é diretamente proporcional à diferença de potencial elétrico ao qual foi submetido.

A razão da carga Q pela tensão elétrica V entre os dois condutores é denominado capacitância C (NUSSENZVEIG, 1997), podendo ser definido pela equação 15 que é originária da Equação 7 utilizada para verificar a carga em um capacitor.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (15)$$

Onde: Q é a quantidade de carga, V é a ddp entre os condutores e C é a capacitância.

A unidade SI de capacitância é *Farad*. Um *Farad* é igual a um Coulomb por volt ($1F=1C/V$), (SEARS, 2004). Como a diferença de potencial é proporcional a carga, esta razão definida na Equação 7, não depende de Q ou V , mas apenas do tamanho, forma e posição relativa entre as armaduras ou condutores (TIPLER; MOSCA, 2009). Tipicamente quanto maior é a área superficial de um condutor, mais carga ele pode armazenar para um dado potencial (TIPLER; MOSCA, 2009).

Tomando um capacitor de placas planas como um caso particular para o cálculo de capacitância, podemos desprezar o efeito das bordas como nos sugere a Equação 11, supondo também que \vec{E} é constante em toda a região das placas.

Escolhendo uma superfície gaussiana que envolve apenas a carga $q+$, como ilustrado na Figura 5, escrevemos a Equação 10 onde: $q = \epsilon_0 * E * A$.

De acordo com a Equação 12: $V = \int_+^- E * ds$, podemos resumir-la à Equação 16 descrevendo-a abaixo.

$$V = E * d \quad (16)$$

Substituindo o valor de q dado pela Equação 10 e o valor V dado pela Equação 12 é possível reescrever a Equação 15 e substituí-la pela Equação 17 onde teremos um cálculo de capacitância para um capacitor mergulhado no vácuo.

$$C = \epsilon_0 * \frac{A}{d} \quad (17)$$

Assim a capacitância depende apenas de fatores geométricos como:

- Área $A (m^2)$ das placas;
- Distância $d (m)$ entre as placas;

A permissividade elétrica do vácuo ϵ_0 que possui um valor de $8,85 * 10^{-12} pF$ (pico *Farad*) não altera os valores de capacitância por ser uma constante universal. Importante observar que C (capacitância) é diretamente proporcional a $A (m^2)$ e inversamente proporcional a $d (m)$.

Outra forma de se calcular a capacitância de um capacitor placas planas pode ser obtida a partir do campo elétrico entre as placas como podemos visualizar na equação 18. A Equação 18, nos apresenta essa determinação onde σ é o módulo da densidade de carga superficial sobre cada placa e sua unidade adotada no SI C/m^2 e E é o campo elétrico entre as placas.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (18)$$

Essa densidade é igual ao módulo da carga Q dividido pela área A da placa (SEARS, 2004), como podemos visualizar na Equação 19.

$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad (19)$$

Substituindo σ pela sua igualdade teremos a Equação 20.

$$E = \frac{\frac{Q}{A}}{\epsilon_0} \quad (20)$$

A simplificação da equação 15 nos apresenta a Equação 21.

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 * A} \quad (21)$$

Para o campo elétrico uniforme e distancia d a diferença de potencial entre as placas condutoras é equacionada pela Equação 22.

$$V_{ab} = E * d \quad (22)$$

Inserindo a Equação 21 na Equação 22 teremos e equação 23 para calcular a ddp nas placas condutoras.

$$V_{ab} = \frac{Qd}{\epsilon_0 * A} \quad (23)$$

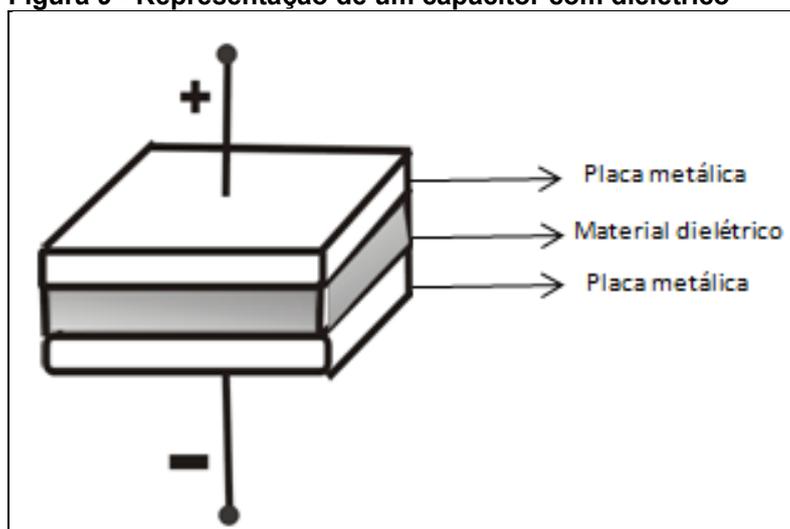
Pelas relações proporcionada pela Equação 07, vemos que a capacitância C de um capacitor com placas condutoras paralelas no vácuo é dada pela razão entre a carga Q e a ddp V entre as placas.

Substituindo V_{ab} pela sua igualdade na Equação 23, a capacitância para capacitores no vácuo assume novamente o formato da Equação 17 onde a capacitância é o produto de ϵ_0 pela razão entre A e d .

2.5 DIELETRICO E CONSTANTE DIELETRICA

Um material não condutor como: o ar, vidro, óleo mineral, madeira ou borracha são chamados de dielétrico. Quando o espaço entre duas placas condutoras de um capacitor é ocupado por um dielétrico, a capacitância aumenta por um fator que é característico do dielétrico (TIPLER; MOSCA, 2009). A Figura 9, apresenta um capacitor com placas planas separados por um dielétrico.

Figura 9 - Representação de um capacitor com dielétrico



Fonte: Autoria própria

A razão para o aumento da capacitância, é que o campo elétrico entre as placas diminui com a presença do dielétrico e conseqüentemente a ddp (V) também diminui. Se a intensidade do campo elétrico é E_0 antes de ser inserido um dielétrico entre as placas, depois da inserção a intensidade se apresenta como mostra a Equação 24 onde: K é a constante dielétrica.

$$E = \frac{E_0}{K} \quad (24)$$

Para um capacitor com placas paralelas, a tensão elétrica entre elas se define na Equação 25 onde: a tensão elétrica (V) é a razão entre a tensão elétrica inicial (V_0) e a constante dielétrica entre as placas (K).

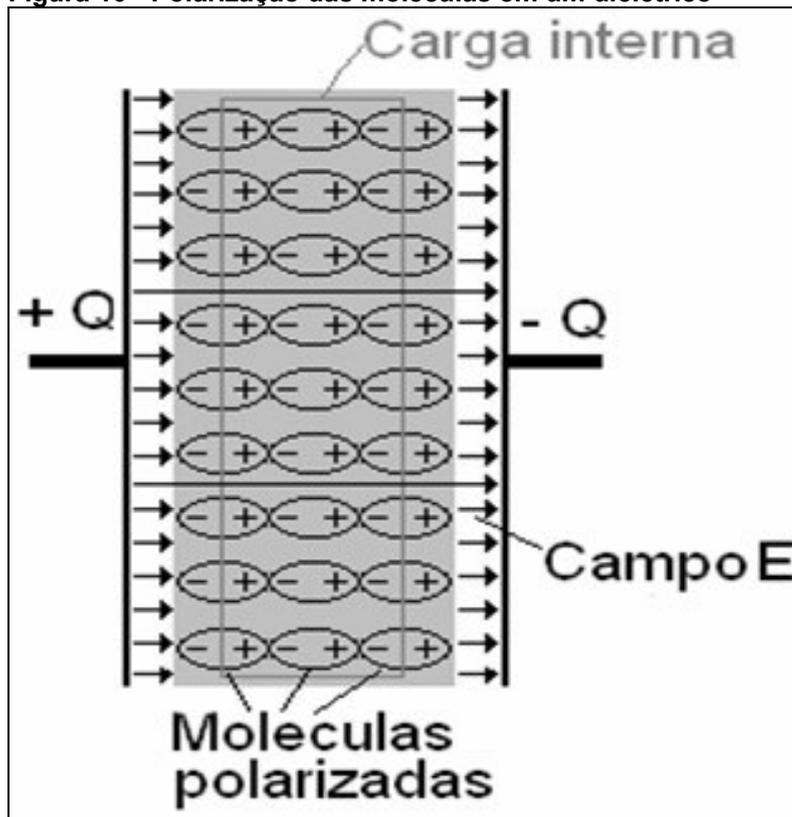
$$V = \frac{V_0}{K} \quad (25)$$

Pela Equação 24, é possível notar que quando existe a presença de dielétrico entre as placas do capacitor, o módulo do campo elétrico é menor e conseqüentemente a densidade superficial de carga que produz esse campo também deveria ser menor. A carga superficial sobre as placas condutoras não varia, porém

surge uma carga induzida com um sinal oposto ao da carga da placa em cada superfície do material dielétrico (SEARS, 2004).

As cargas induzidas surgem na superfície devido a uma redistribuição de cargas positivas e negativas no interior do material dielétrico denominado de polarização como ilustra a Figura 10.

Figura 10 - Polarização das moléculas em um dielétrico



Fonte: Adaptado ((TIPLER; MOSCA, 2009)

A Figura 2, apresentou um capacitor básico onde o mesmo conectado em circuito elétrico alimentado por uma bateria, tem uma corrente circulante nas suas placas até que elas adquiram uma ddp igual a da bateria e estando assim o capacitor carregado. Nesse caso específico temos como dielétrico apenas o vácuo.

Colocando-se agora um outro material isolante entre as placas além do vácuo, permanecendo constante todas as dimensões anteriores, circulará da mesma forma uma corrente, só que mais intensa e por mais tempo. A relação das cargas adquiridas pelas placas com material isolante, comparadas com aquelas quando existia entre elas apenas o vácuo, se conhece como coeficiente dielétrico ou constante dielétrica e se representa pela letra K (MORÁN, 2005) porém nesse trabalho, K será substituído

por ε_r . O termo ε_r pode ser definido pela Equação 26 onde: C representa o valor da capacitância com outro dielétrico além do vácuo e C_0 se refere ao valor da capacitância apenas com o vácuo entre suas placas condutoras.

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (26)$$

Para um capacitor com placas paralelas a capacitância será então o produto da constante dielétrica ε_r pela capacitância do capacitor mergulhado no vácuo como mostra a Equação 27.

$$C = \varepsilon_r * C_0 \quad (27)$$

Se o espaço entre as placas estiver totalmente preenchido pelo isolante, a capacitância aumenta por um fator ε_r que só depende da natureza do material isolante, e não da forma ou tipo do capacitor (NUSSENZVEIG, 1997). Se desmembrarmos C_0 que é igual ao produto ε_0 pela razão entre a área A e a distância d obteremos a Equação 28 que representará a forma de se calcular a capacitância de um capacitor plano com dois dielétricos onde: ε_r representa o valor relativo do material isolante, ε_0 é a constante universal da permissividade elétrica do vácuo.

$$C = \varepsilon_r * \varepsilon_0 * \frac{A}{d} \quad (28)$$

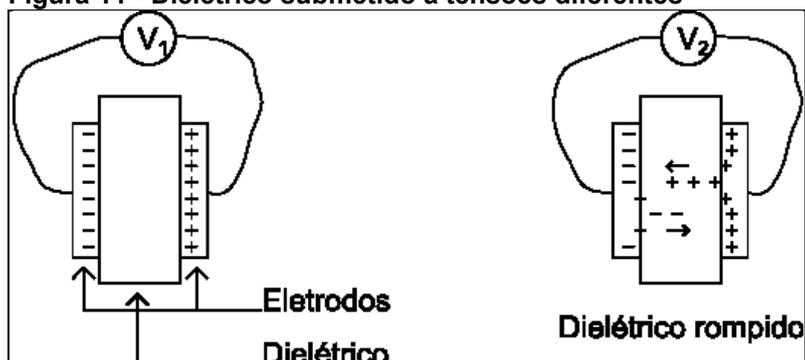
Podemos simplificar a Equação 24 através do produto entre ε_r e ε_0 , obtendo assim um novo parâmetro conhecido como permissividade elétrica do meio isolante representada por ε com esta ilustrado na Equação 29.

$$C = \varepsilon * \frac{A}{d} \quad (29)$$

Dielétricos não apenas aumentam a capacitância de um capacitor, mas também fornecem maneiras de manter placas condutoras paralelas isoladas uma da outra podendo aumentar a diferença de potencial aplicadas sobre elas sem ocorrer a ruptura dielétrica. Quando ocorre a ruptura dielétrica o material dielétrico passa a se comportar com condutor (HALLIDAY, 2009).

Existe um nível máximo do campo elétrico (tensão por unidade de espessura do dielétrico) que o material pode suportar por um longo período sem falhar, ao qual recebe o nome de rigidez dielétrica do material. Esta propriedade é muito importante, pois, em várias aplicações o material deve suportar elevados campos elétricos sem se romper. A Figura 11, ilustra um dielétrico que é submetido à uma tensão V_1 através de dois condutores. Se essa tensão V_1 não for suficiente para romper o dielétrico, não haverá corrente significativa circulando entre os eletrodos. Caso seja aplicada uma tensão V_2 , alta o suficiente para romper o dielétrico, uma corrente começará a circular entre os eletrodos podendo colocar em curto as placas condutoras.

Figura 11 - Dielétrico submetido a tensões diferentes



Fonte: Autoria própria

A tabela 1 lista as permissividades e a rigidez dielétricas de alguns materiais. Observe que para o ar, $\varepsilon_r \approx 1$, assim não é preciso fazer distinção entre o ar e o vácuo.

Tabela 1 - Permissividade de alguns materiais

| Material | Permissividade ε | Rigidez dielétrica $\left(\frac{kV}{mm}\right)$ |
|----------|------------------------------|---|
| Ar | 1,0059 | 3 |

| | | |
|-----------------------|------------|--------|
| Baquelita | 4,9 | 24 |
| Gasolina | 2,0 (70°F) | ----- |
| Mica | 5,4 | 10-100 |
| Neoprene | 6,9 | 12 |
| Óleo de transformador | 2,24 | 12 |
| Vidro (Pirex) | 5,6 | 14 |
| Madeira | 2,5 á 6,8 | ----- |

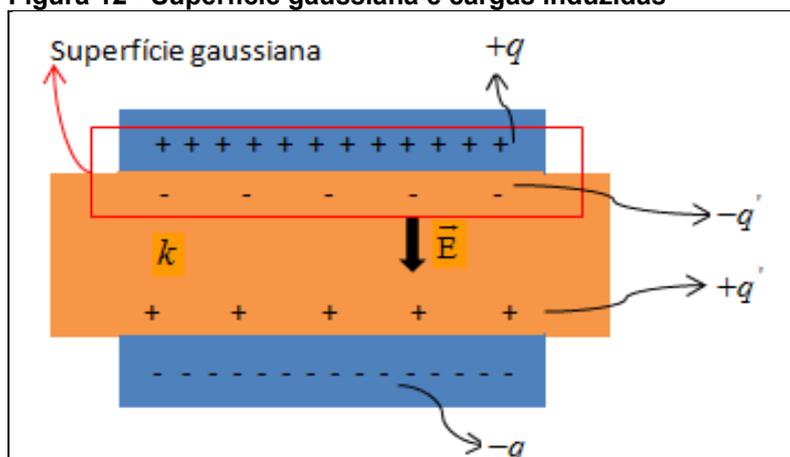
Fonte: Adaptado de: (TIPLER; MOSCA, 2009), Física 2º Grau - Robortela, Avelino e Edson - Editora Ática - Volume 7 (Eletrostática)

2.5.1 Dielétricos e a Lei de Gaus

Na ausência de um dielétrico entre as placas de um capacitor placas planas, podemos calcular o campo elétrico \vec{E}_0 entre as placas da mesma maneira como foi demonstrado nas Equações 04 e 05 onde foi aplicado a lei de Gauss. A Figura 5 demonstrou onde a carga $+q$ é envolvida com uma superfície gaussiana (HALLIDAY, 2009).

Com um dielétrico entre as placas condutoras podemos nos utilizar da Lei de Gauss para calcular o campo elétrico entre as placas (e no interior do dielétrico) usando a mesma superfície gaussiana (HALLIDAY, 2009). Porém a superfície gaussiana envolve agora dois tipos de cargas: cargas $+q$ da placa superior do capacitor e a carga induzida $-q'$ da superfície superior do dielétrico como podemos visualizar na Figura 12.

Figura 12 - Superfície gaussiana e cargas induzidas



Fonte: Adaptado, (HALLIDAY, 2009)

As cargas das placas do capacitor $+q$ são cargas livres pois podem se mover sob a ação de um campo elétrico porém as cargas induzidas q' na superfície do dielétrico não podem se mover e conseqüentemente não são cargas livres.

Como a carga total envolvida pela superfície gaussiana é: $q - q'$ a lei de Gauss nos dá a Equação 30.

$$\epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q - q' \quad (30)$$

Resolvendo a integral da Equação 30 a mesma pode ser representada na Equação 31.

$$E = \frac{q - q'}{\epsilon_0 A} \quad (31)$$

O campo original é a razão de ϵ_0 por K como mostrado na Equação 24, podemos comparar a Equação 25 com a Equação 31 e equacionar a Equação 32.

$$q - q' = \frac{q}{K} \quad (32)$$

A Equação 31, nos mostra que para $K = 1$, que o valor absoluto da carga induzida q' na superfície do dielétrico, é menor que a carga livre q , e que é zero na ausência de um dielétrico.

As equações desenvolvidas através da Lei de Gauss a partir da equação é válida para todos os tipos de capacitores.

2.6 SENSORES CAPACITIVOS

Como citado anteriormente os capacitores tem uma infinidade de aplicações, principalmente nos meios eletrônico. A função ou a aplicação pode caracterizar o capacitor e diante dessa afirmação, uma outra aplicação dos capacitores é que esses dispositivos podem atuar como sensores onde tem-se uma ampla gama de aplicações.

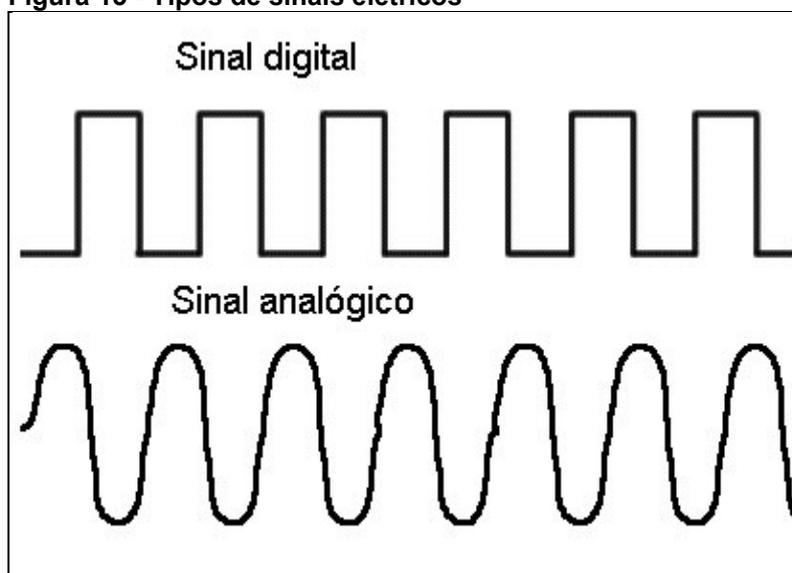
Um sensor capacitivo opera de forma similar a um capacitor comum utilizado nos meios elétrico e eletrônico. O que os difere, é a aplicabilidade de cada um, nas suas formas construtivas e o meio isolante entre seus condutores. Devido a sua alta precisão, boa parte das aplicações destes sensores tem relação com a medição de precisão. Algumas destas aplicações específicas dos sensores capacitivos estão listadas abaixo:

- Medição de posicionamento com alta precisão:
- Medição de espessura:
- Testes de linha de produção/verificação de uniformidade nas dimensões dos mecanismos produzidos.
- Identificação da composição de certos materiais de diferentes permissividades.
- Aplicações gerais de sensores: Chave fim de curso sem contato, contador, entre outras funções.

Um sensor é um tipo de transdutor, transformando um tipo de energia em outra utilizada para a leitura de alguma condição ou característica do ambiente ou de um material e podem gerar sinais analógicos ou digitais. Grande parte dos sensores são analógicos, pois quase todos os parâmetros que serão medidos também o são.

Sinais analógicos são aqueles que, mesmo limitados entre dois valores de tensão elétrica, podem assumir infinitos valores intermediários. Isso significa que para cada nível da condição medida, haverá um nível de tensão elétrica correspondente. Já os sensores digitais baseiam-se em níveis de tensão elétrica bem definidos. Tais níveis de tensão podem ser descritos como *Alto (High)* ou *Baixo (Low)*, ou simplesmente “1” e “0”. Ou seja, esses sensores utilizam lógica binária, que é a base do funcionamento dos sistemas digitais. A Figura 13, nos apresenta um tipo de sinal analógica e outra com o tipo de sinal digital.

Figura 13 - Tipos de sinais elétricos



Fonte: Aatoria própria

Em um sensor analógico “ideal”, para a variação de uma determinada condição, haverá uma variação na mesma proporção de alguma de suas propriedades, como tensão ou resistência. Sensores “reais” porém, estão sujeitos à certas limitações ao seu funcionamento. Erros de medida e os materiais utilizados em sua construção limitam a sensibilidade e a faixa de operação do sensor.

A utilização desses sensores num circuito analógico é realizada sem problemas, porém, quando for necessário monitorá-lo através de algum circuito digital, como um microcontrolador ou um computador, esses sinal deverá ser convertido num sinal digital equivalente. Isso porque o funcionamento desses sistemas baseia-se em sinais digitais, que podem ser gravados e processados muito mais facilmente do que os analógicos.

Podemos classificar os sensores analógicos de acordo com o modo o qual respondem às variações. Tal resposta deverá ser na forma da variação de alguma propriedade elétrica, como resistência, tensão, capacitância, dentre outros (PATSKO, 2006).

Para os sensores capacitivos, a variação de determinada condição ocasiona uma variação na capacitância do componente. Essa variação na capacitância pode auxiliar na identificação da permissividade elétrica de um dado material.

2.6.1 Métodos para Leitura de Capacitância

O capacímetro, é um instrumento projetado para medir capacitâncias. Alguns modelos de multímetros digitais também já apresentam uma função para medir capacitâncias. No entanto, implementar dispositivos eletrônicos que funcionem em conjunto com os sensores capacitivos cujo a função é a aquisição de sinais, provenientes das variações das propriedades elétrica de um determinado material em função do tempo, temperatura e contaminantes típicos, pode ser uma solução a um custo benefício viável.

Se um sinal se repete no tempo, então ele possui uma frequência (f) e um período (T). A frequência é medida em *hertz* (Hz) e é igual ao número de vezes que o sinal se repete em um segundo. O período é medido em segundos (s) e corresponde ao intervalo de tempo que um sinal leva para completar um ciclo. O período e a frequência são inversamente proporcionais, isto é: $T = 1/f$. Como o capacitor pode gerar sinais que se repetem no tempo, podemos então se utilizar de três métodos muito utilizados, para se encontrar a capacitância de um sensor capacitivo:

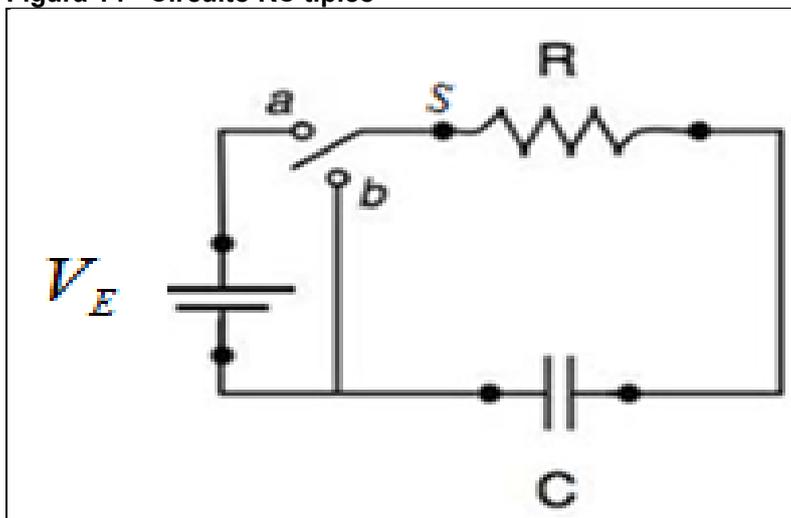
- Calcular o tempo de carga e descarga de um capacitor;
- Calcular a frequência de saída de um oscilador no modo astável;
- Implementar circuitos em ponte para se encontrar valores de capacitâncias através do modo de comparação.

2.6.2 Tempo de Carga e Descarga de um Capacitor em um Circuito RC

Quando ligamos um circuito com uma resistência R , a tensão se eleva instantaneamente ao seu valor máximo. Mas quando inserimos um capacitor neste

circuito a tensão demora certo tempo para assumir seu valor máximo V_E . Um circuito composto por um capacitor e um resistor recebe o nome de circuito RC e está ilustrado na Figura 14 abaixo.

Figura 14 - Circuito RC típico



Fonte: Adaptado, (HALLIDAY, 2009)

No circuito da Figura 14, o capacitor está inicialmente descarregado. Para carregá-lo colocamos a chave S na posição a , completando dessa maneira o circuito RC. No momento em que o circuito é completado, cargas começam a se mover eletrizando as armaduras do capacitor até o instante que a tensão V_C (tensão entre as placas do capacitor), for igual a tensão V_E da fonte e como consequência, não há mais corrente elétrica circulando no circuito. Dizemos então que o capacitor está carregado como visualizemos na Figura 04.

Enquanto o capacitor está sendo carregado, a carga q , a ddp V_C e a corrente i variam com o tempo. Aplicando a regra das malhas ao circuito temos a Equação 33.

$$V_E - iR - \frac{q}{C} = 0 \quad (33)$$

A Equação 29 possui duas variáveis, i e q . Entretanto, as variáveis não são independentes, mas são relacionadas através da Equação 34.

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (34)$$

Combinado as equações 33 e 34 temos a Equação 35.

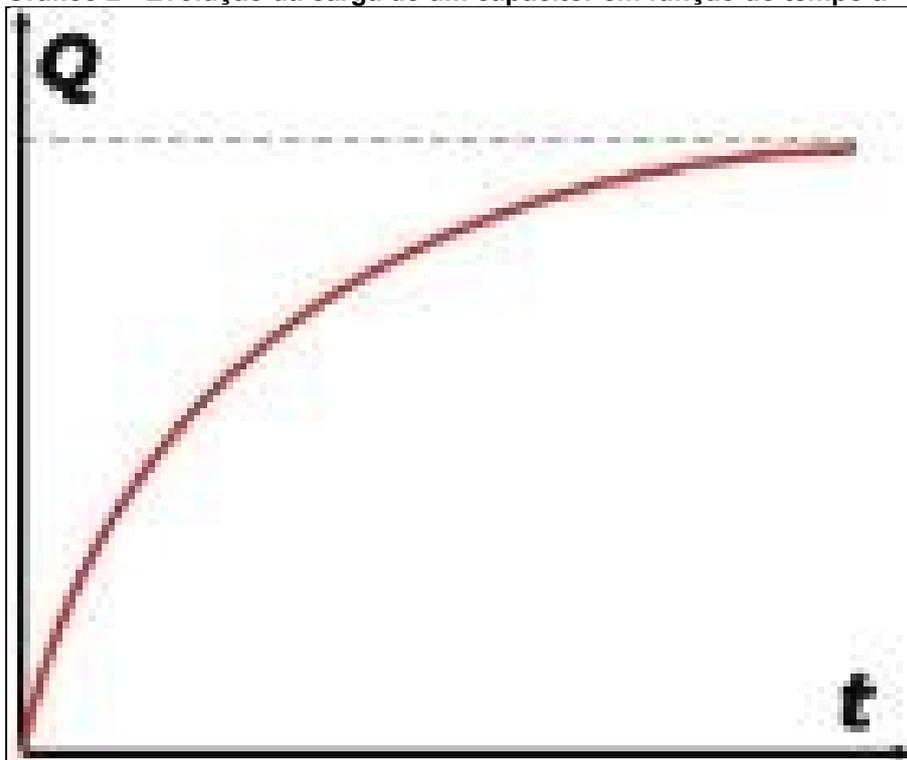
$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{c} = V_E \quad (35)$$

A Equação 35 é uma equação diferencial que descreve a variação com o tempo da carga Q no capacitor da Figura 16. Para resolver a Equação 35 é preciso encontrar a função $q(t)$ que satisfaz essa equação e também a condição que o capacitor esteja inicialmente descarregado ou seja $q = 0$ no instante $t = 0$. A solução para essa equação, é apresentada na Equação 36.

$$q = CV_E \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (36)$$

A Equação 36 satisfaz a condição de $q = 0$ para quando $t = 0$ já que nessa condição de t , o termo $e^{-\frac{t}{RC}}$ será igual a 1. Satisfaz também quando t tender ao infinito onde o termo $e^{-\frac{t}{RC}}$ tenderá a zero, significando que a Equação 36 será igual a Equação 7 ($Q = CV$). O gráfico 2, mostra o gráfico $q(t)$ em função de t .

Gráfico 2 - Evolução da carga de um capacitor em função do tempo t.



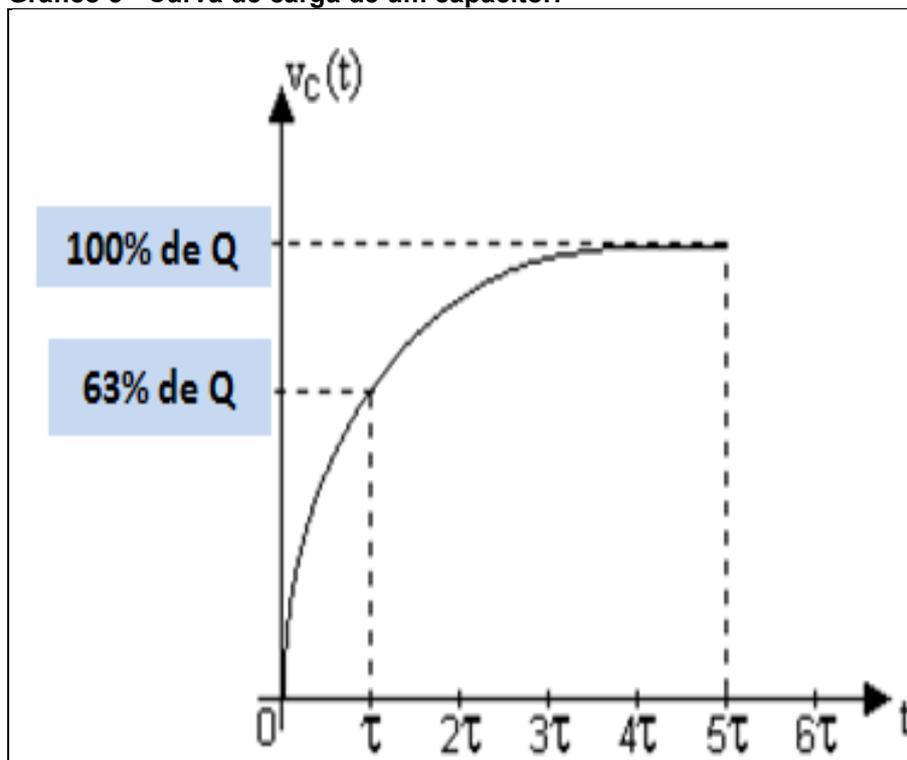
Fonte: Adaptado, (NUSSENZVEIG, 1997).

Combinada as Equações 7 e 36 descobrimos que a diferença de potencial $V_C(t)$ entre as placas do capacitor durante o processo de carregando é representada pela Equação 37.

$$V_C = V_E(1 - e^{-t/RC}) \quad (37)$$

O Gráfico 3, mostra o gráfico de evolução de V_C em função do tempo.

Gráfico 3 - Curva de carga de um capacitor.



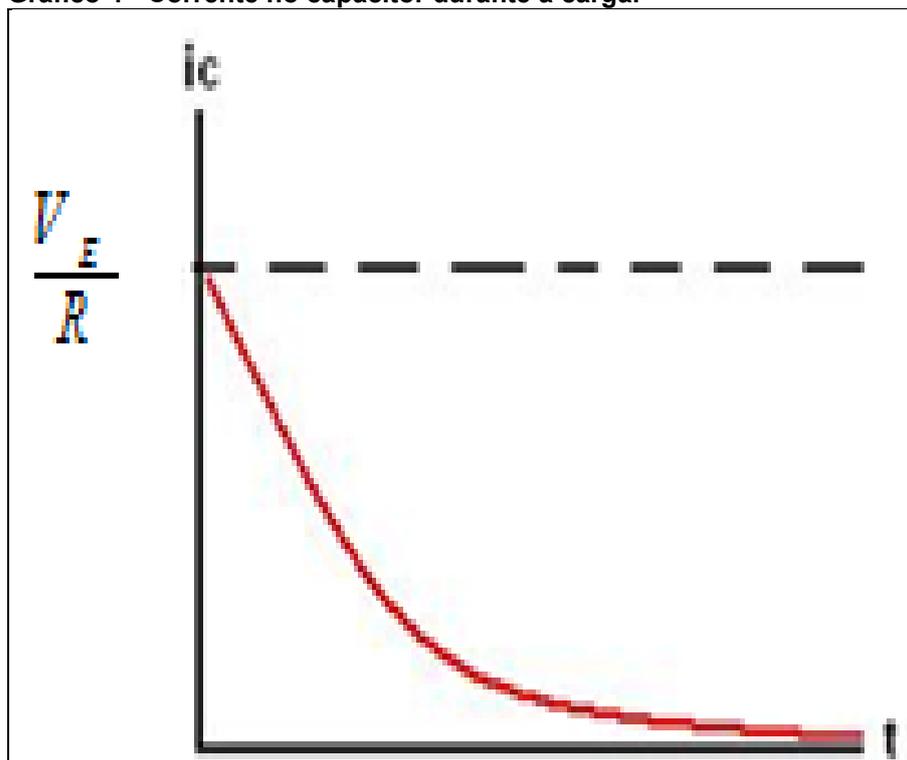
Fonte: Adaptado, (NUSSENZVEIG, 1997).

A derivada de $q_{(t)}$ é a corrente de carregamento do capacitor como visualizemos na Equação 34 e terá a sua igualdade representada pela Equação 38.

$$i = \left(\frac{V_E}{R} \right) e^{-t/RC} \quad (38)$$

O Gráfico 4, mostra o gráfico de $i_{(t)}$ em função de t durante o processo de carregamento do capacitor. O valor inicial da corrente é V_E / R .

Gráfico 4 - Corrente no capacitor durante a carga.



Fonte: Adaptado, (NUSSENZVEIG, 1997).

Importante observar que um capacitor que está sendo carregado se comporta inicialmente como um fio comum e após um período de tempo suficiente para ser carregado ele se comporta como um fio interrompido no circuito elétrico (HALLIDAY, 2009). Essa afirmação explica a inversão de comportamento entre corrente e tensão no circuito RC.

O produto RC que aparece nas Equações 36, 37 e 38, tem dimensão de tempo e é chamado de constante de tempo capacitiva do circuito e representado pela letra τ (*Tau*) onde sua equação é apresentada na Equação 39.

$$\tau = RC \quad (39)$$

De acordo com a Equação 36, no instante $t = \tau (= RC)$ a carga do capacitor Figura 18, durante a primeira constante de tempo de τ a carga aumentou de zero para 63% do valor final. Os tempos de carregamento dos circuitos RC são expressos em termos de τ e quanto maior o valor de τ maior o tempo necessário para carregar um capacitor (HALLIDAY, 2009).

2.6.3 Descarga de um Capacitor

Quando descarregamos um capacitor sua carga não cai à zero instantaneamente. Estando o capacitor da Figura 17 totalmente carregado, em um novo instante $t = 0$ a chave S é colocada da posição a para a posição b, fazendo com que o capacitor comece a se descarregar pelo resistor R. Como aconteceu no momento de carga do capacitor a carga q e a corrente i irão variar em função do tempo no circuito. A equação diferencial será a mesma da Equação 35 porém como a fonte não está mais no circuito a sua igualdade não será mais igual a V_E e sim igual a zero. a solução para a equação de descarga de um capacitor será como definido na Equação 36 onde q_0 é a carga inicial do capacitor.

$$q = q_0 e^{-t/RC} \quad (40)$$

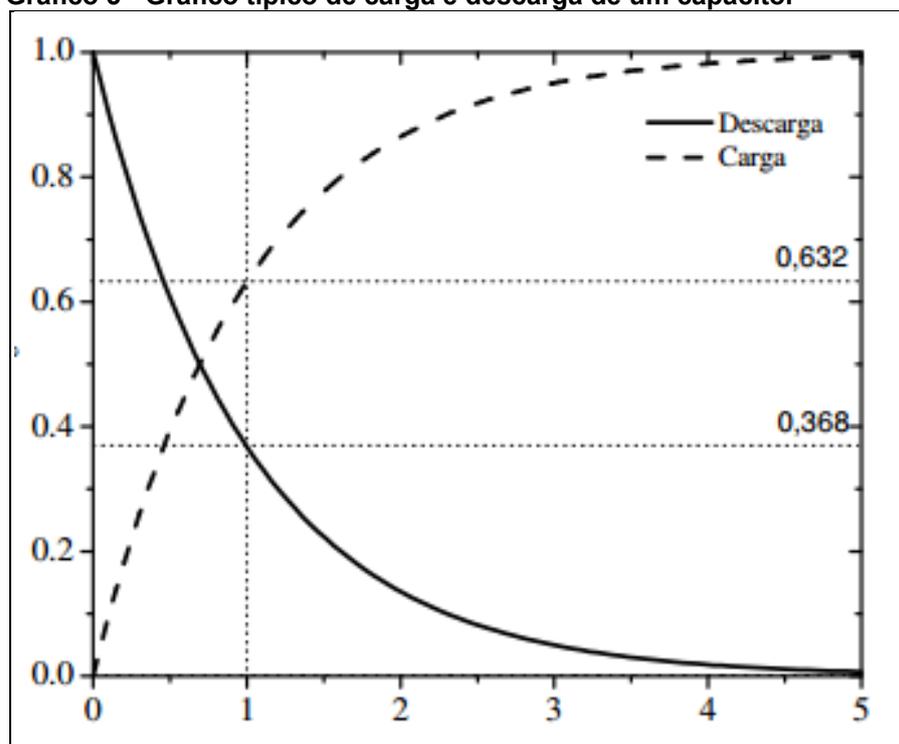
De acordo com a equação 39 a carga diminui exponencialmente com o tempo a uma taxa que depende da constante de tempo capacitiva $\tau = RC$. quanto maior o valor de τ maior o tempo de descarregamento.

Derivando a Equação 34, obtemos a corrente que também diminui exponencialmente. A derivado da corrente ($i = dq / dt$) para a descarga do capacitor é apresentada na equação 41.

$$-\left(\frac{q_0}{RC}\right) e^{-t/RC} \quad (41)$$

O Gráfico 5, apresenta as curva típicas de carga e descarga de um capacitor. Importante observar que a corrente se inverte nesses dois casos e que são normalmente necessário 5 constantes de tempo para a carga e descarga. Podemos mostrar nesta figura, que o tempo de descarga de um capacitor é igual ao tempo de carga desde que seja feito nas mesmas condições, ou seja, em um circuito com a mesma resistência R.

Gráfico 5 - Gráfico típico de carga e descarga de um capacitor



Fonte: Adaptado, (TIPLER; MOSCA, 2009)

Diante da Equação 39 é possível conhecer o valor de capacitância tendo o valor de τ quando o capacitor atingir 63% da sua carga como visualizemos na Figura 18, já que a sua carga total, somente será alcançada no infinito. É possível também encontrar a capacitância através das equações 36,37 e 38 que foram encontradas durante a carga do capacitor. Para se utilizar dessas equações é necessário caracterizar o circuito RC como visualizado na Figura 16.

2.6.4 Circuitos Osciladores

Osciladores são amplificadores que geram um sinal de saída sem a necessidade de um sinal de entrada. São compostos por elementos configurados para ganhos elevados e largura de banda pequena (BRAGA, 1996).

Os osciladores podem ser com saída de onda:

- Senoidal;
- Quadrada;
- Triangular.

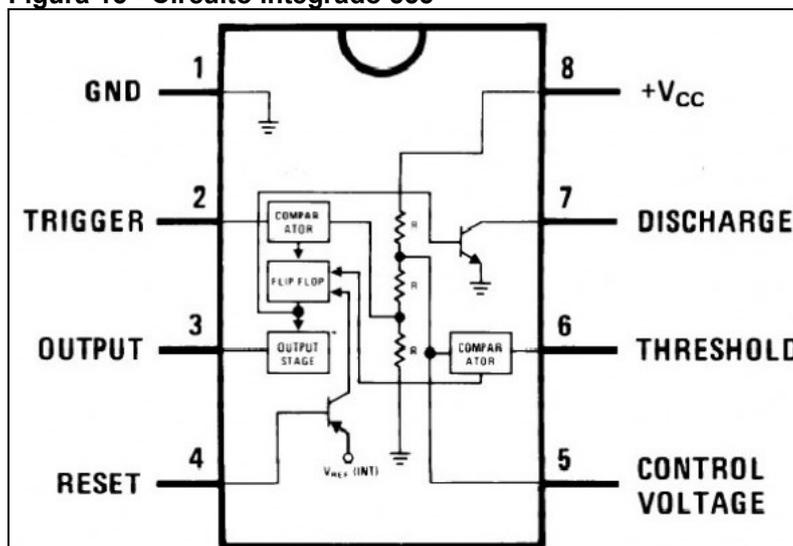
Condição de oscilação:

a) Realimentação positiva: o sinal de realimentação deve voltar em fase com o sinal de entrada.

b) O ganho de voltagem global do circuito deve ser maior do que 1: o ganho do amplificador deve ser suficiente para superar as perdas associadas com qualquer rede de realimentação seletiva em relação à frequência.

Quando se pensa em qualquer projeto em que a geração de formas de onda é necessária como: retardo, temporizações ou o disparo de dispositivos a partir de sinais de todos os tipos, o componente que em primeiro lugar vem a cabeça do projetista é um Circuito Integrado 555. O CI555 consiste em um *timer* de uso geral que pode operar tanto na configuração astável quanto monoestável. A pinagem básica e a configuração interna dos componentes deste CI é mostrada na Figura 15.

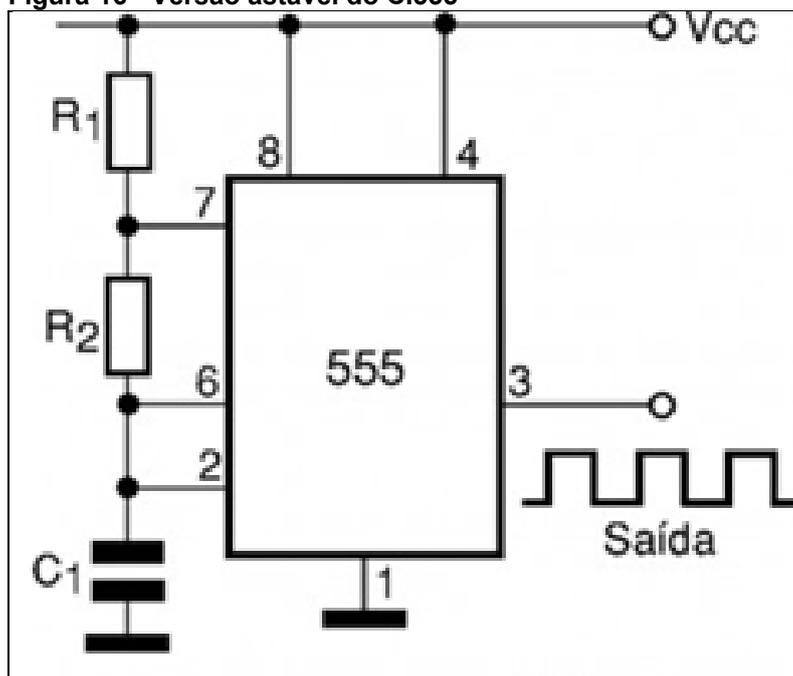
Figura 15 - Circuito integrado 555



Fonte: Adaptado, (BRAGA, 1996)

Na versão astável, a saída no pino 3 gera um sinal retangular com uma frequência entre 0,01 Hz a 500 kHz. O esquema de ligação dos pinos do CI 555 e a forma de onda na saída, é mostrada na Figura 16.

Figura 16 - Versão astável do CI555



Fonte: Adaptado, (BRAGA, 1996)

O cálculo da frequência de oscilação no pino de saída do CI 555 é obtida pela Equação 42 onde: f é a frequência em hertz, R_1, R_2 são os valores dos resistores em Ohms, C é a capacitância em Farads.

$$f = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2)C} \quad (42)$$

O tempo em que a saída no pino 3 permanece no nível alto e baixo como foi possível observar na Figura 22, é dado respectivamente pelas Equações 43 e 44 abaixo.

$$th = 0,693 * C (R_1 + R_2) \quad (43)$$

$$tl = 0,693 * R_2 * C \quad (44)$$

Pelas Equações 38, 39 e 40 é possível constatar que a frequência do sinal de saída do pino 3 do CI555 e os tempos de nível alto e baixo, são diretamente influenciados pelo valor de capacitância do capacitor C_1 apresentado na Figura 22. Para encontrarmos o valor de capacitância basta apenas isolarmos a incógnita C nas três equações citadas acima.

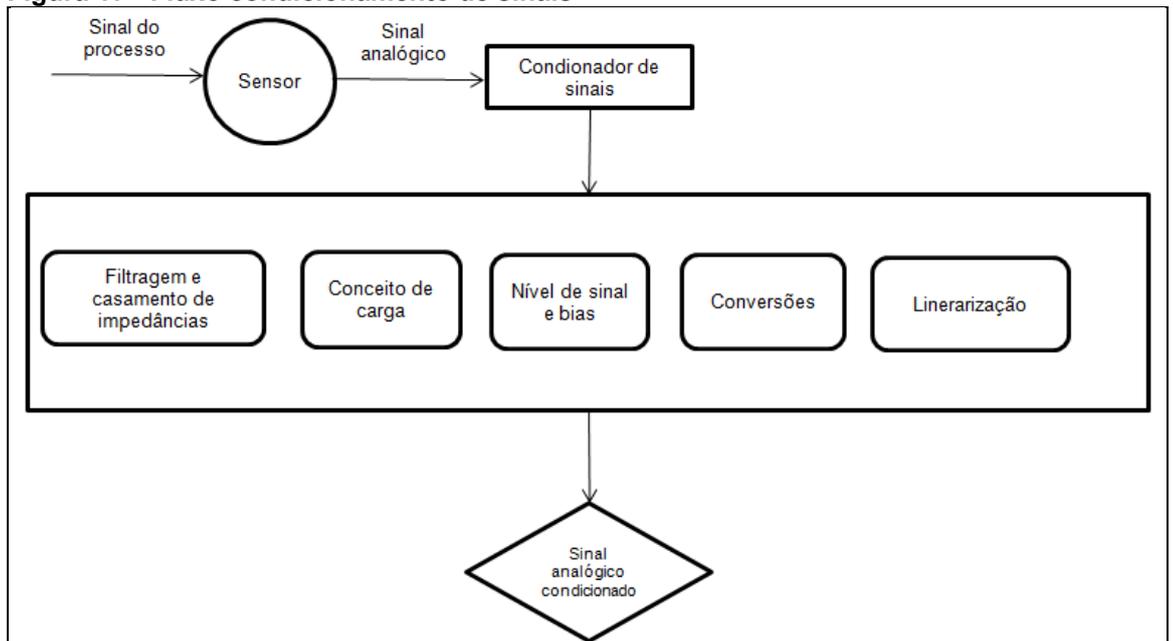
2.6.5 Pontes de Medidas Elétrica

A forma mais comum de se medir capacitância, é usando circuitos em ponte. De forma geral, circuitos em ponte usam resistores, indutores e capacitores para comparar a grandeza desconhecida (neste caso, capacitância) com os valores já conhecidos presentes no circuito (BRAGA, 1996). As mais comuns, no caso de capacitância, são as pontes de resistência-capacitância em série, pontes de resistência-capacitância em paralelo, ponte de *Wien* e ponte de *Schering*.

A medição é realizada quando a diferença de potencial medida entre os ramos da ponte é nula, caso em que se diz que o circuito está balanceado. Nesta situação, o valor da grandeza a ser medida é proporcional ao valor conhecido. As Pontes utilizadas para leitura de capacitância podem operar em CA ou CC.

2.6.6 Sistemas de Condicionamento e Aquisição de Sinais

Condicionar um sinal é convertê-lo de forma adequada e torna-lo possível de realizar uma interface com outros elementos. Os sinais analógicos têm de ser previamente condicionados a fim de estarem em condições adequadas de serem aquisitados. O condicionamento de sinal passa por várias etapas: amplificar, filtrar e equalizar o sinal para que este ganhe níveis de tensão adequados, com boa relação sinal/ruído e distorção harmônica mínima. A Figura 17, nos mostra as ações de um condicionamento de sinais.

Figura 17 - Fluxo condicionamento de sinais

Fonte: Autoria própria

Os circuitos de condicionamento de sinal utilizados apresentam uma grande variedade de características como:

- **Amplificação:** Os sinais de baixa intensidade como os dos termopares, por exemplo, devem-se amplificar para aumentar a resolução e reduzir o ruído.
- **Isolamento:** O sistema a ser monitorado pode conter "transientes" de alta tensão que podem danificar o conversor. Outra razão para o isolamento é garantir que as leituras do equipamento de aquisição são imunes a diferenças de potencial entre as terras ou a tensões em modo comum (CMV).
- **Multiplexagem:** Trata-se duma técnica para medir diversos sinais utilizando um único equipamento de medição. Geralmente o equipamento de condicionamento de sinal para sinais analógicos fornece multiplexagem para uso com sinais que variam lentamente, tais como temperatura.
- **Filtragem:** O objetivo de um filtro é remover os sinais indesejados do sinal que se está a medir. Um filtro de ruídos é utilizado para sinais DC,

como temperatura, para atenuar os sinais de alta frequência, que podem reduzir a precisão da medição.

- Excitação: O condicionamento de sinais pode gerar a excitação para alguns transdutores. Os extensímetros, termistores, e RTDs, por exemplo, requerem uma tensão externa ou corrente de excitação.
- Linearização: Muitos transdutores, como os termopares, têm uma resposta não linear às variações nos fenômenos que estão sob medição.

Alguns sensores necessitam dos circuitos condicionadores de sinal para serem excitados por um sinal que pode ser de tensão ou de corrente

Para se determinar, se um condicionamento de sinais é necessário em um sistema de aquisição de dados, deve-se entender a natureza do sinal, a configuração que se está a usar para medir o sinal e os efeitos do ambiente em redor do sistema.

A aquisição do sinal analógico culmina na sua amostragem e posterior conversão analógica digital (A/D). O seu objetivo é apresentar ao observador os valores das variáveis ou parâmetros que estão sendo medidos onde irá proporcionar: níveis maiores de qualidade, redução dos custos operacionais, maior desempenho de produção e fundamentalmente, para facilitar a excelência operacional.

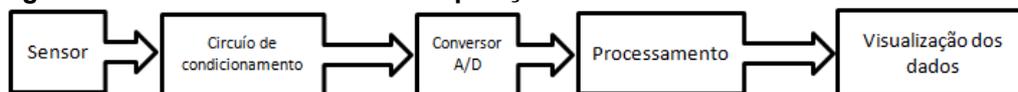
Um sistema de aquisição de dados típicos para aplicações em Engenharia Elétrica é composto pelos seguintes elementos:

- Sensores e Transdutores;
- Condicionadores de Sinais;
- Módulo ou Placa de Aquisição de Dados;
- Processador.

Os sistemas de aquisição têm por finalidade obter dados digitais através de medições de grandezas físicas (analógicas), tais como temperatura, pressão, densidade, pH, umidade, posição, etc. Estas grandezas são “sentidas” por sensores ou transdutores e são convertidas em quantidades elétricas por condicionadores de sinais que levam os sinais até hardwares dedicados e os transformam em valores digitais. Estes valores são processados por controladores e segundo lógicas de controles devolvem a resposta processada aos atuadores (elementos finais de

controle). A Figura 18, abaixo ilustra em blocos os elementos de um sistema de aquisição de dados.

Figura 18 - Sistema em blocos de aquisição de dados.



Fonte: Autoria própria

Onde: o sensor capacitivo envia um sinal elétrico ao circuito de condicionamento de sinais. Após ser condicionado, o sinal é recebido pelo sistema de aquisição de dados onde é convertido para um sinal elétrico digital e processado através de um código fonte embarcado no microcontrolador para que seja possível ser visualizado por mensagens gráficas ou de textos em um display ou um outro software integrado ao sistema de aquisição de dados.

3 DESENVOLVIMENTO

Este trabalho, apresenta a implementação de um sensor capacitivo capaz de identificar o teor de umidade de madeiras através da sua propriedade elétrica quando esse material estiver passando por um processo de secagem.

3.1 IMPLEMENTAÇÃO DO SENSOR CAPACITIVO

O sensor capacitivo, será implementado com um formato geométrico retangular e será composto dos seguintes materiais:

- Placas planas condutoras;
- Suporte de material refratário e isolante para a acomodação das placas;
- Cabos para conexões elétrica;
- Circuito eletrônico para condicionamento e aquisição dos sinais elétrico provenientes das propriedades da madeira.

3.1.1 Placas Planas

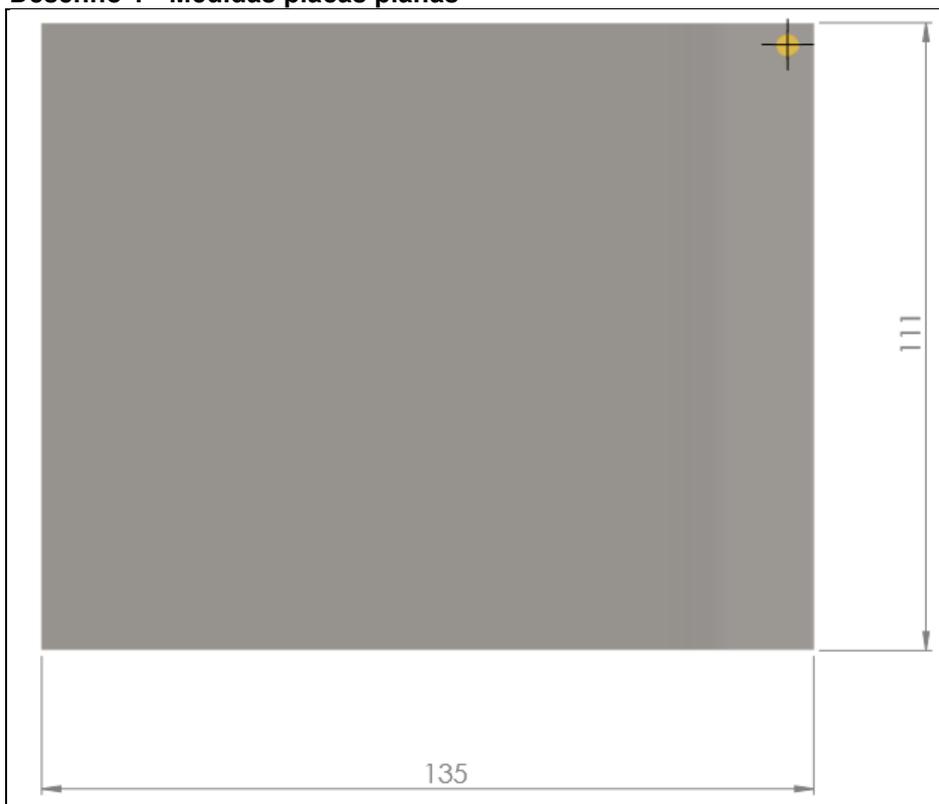
As placas condutoras são constituídas em aço inoxidável 304. A Tabela 02 apresenta as principais características das propriedades físicas e mecânicas do aço inoxidável 304.

**Tabela 2 Principais Características do aço inox 304 (Propriedades tipo:(ABNT – ASTM – AISI).
CARACTERÍSTICAS**

| | |
|-------------------------------------|----------------------|
| Intervalo de Fusão C° | 1398 1454 |
| Coefficiente de Dilatação Térmica | 1,1x10 ⁻⁵ |
| Resistividade Elétrica a temp. Amb. | 70,0 |
| Módulo de rigidez (Gpa) | 86,20 |

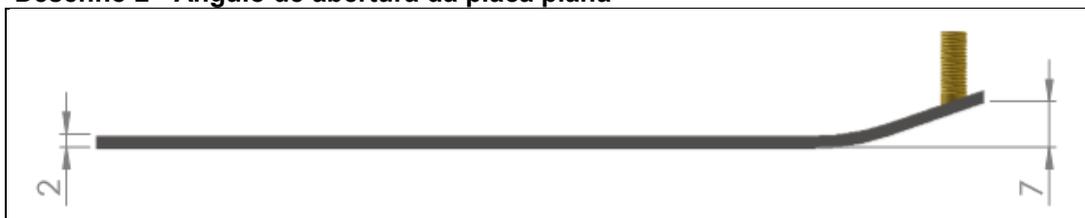
Fonte: Adaptado (<http://sidacoinox.com.br/tabela-de-propriedades/>)

As dimensões das placas serão: 111 x 130 x 2 mm. A área total de cada placa será de 14430mm². O Desenho 1, nos apresenta a placa e suas medidas.

Desenho 1 - Medidas placas planas

Fonte: Autoria própria

O lado da placa plana, que possui medida igual 135 mm, terá 20 mm destinados á implementar um ângulo da abertura entre as placas para inserir os corpos de prova sem que estes fiquem presos nos cantos vivos das placas planas. As novas dimensões para geração do campo elétrico entre as placas será de: 111 x 110 x 2 mm. A área útil, para o calculo da capacitância do sensor com a madeira inserida entre suas placas planas terá um novo valor que será de: 12210 mm². Como podemos visualizar no Desenho 2.

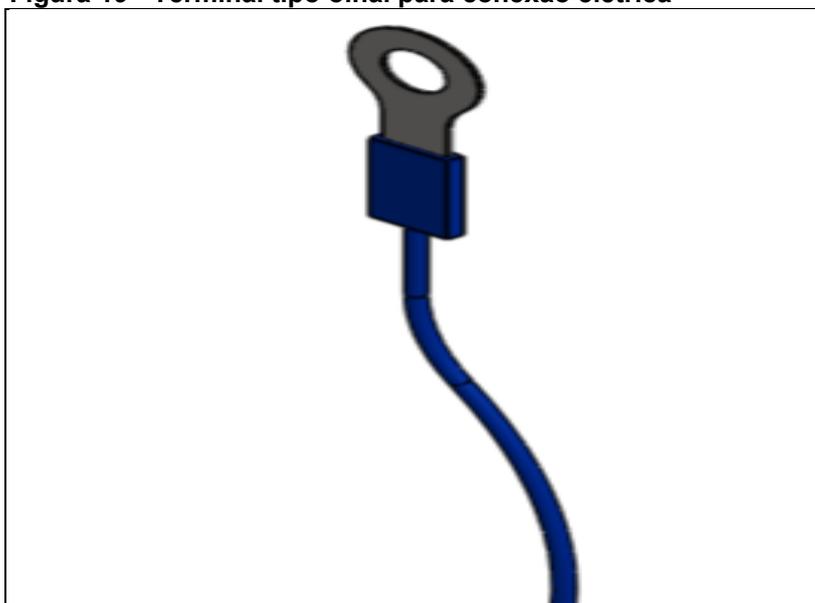
Desenho 2 - Angulo de abertura da placa plana

Fonte: O autor

3.1.2 Cabos para Conexão Elétrica

Os cabos condutores utilizados para a conexão elétrica das placas planas do sensor, apresentam um formato geométrico circular, material de cobre e diâmetro de 1 mm. Para conectar os cabos condutores, foi soldado nas placas, pinos roscados de 5 mm de diâmetro por 12 mm de comprimento. Em uma das extremidades dos cabos condutores foi conectado um terminal tipo olhal. Esse modelo de terminal facilita a conexão entre o cabo condutor e o pino roscado soldado na placa plana podendo alimentá-las eletricamente como podemos visualizar na Figura 19.

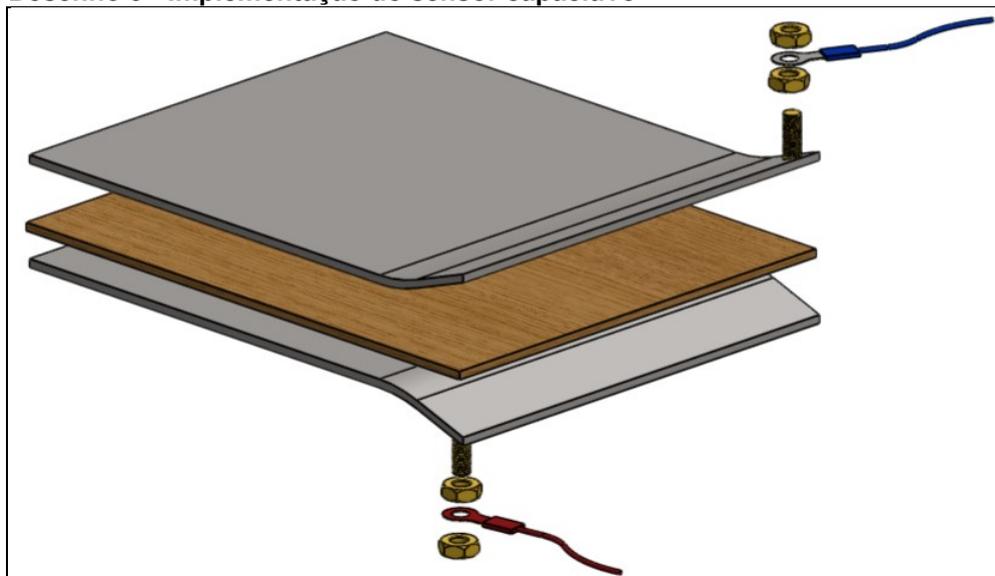
Figura 19 - Terminal tipo olhal para conexão elétrica



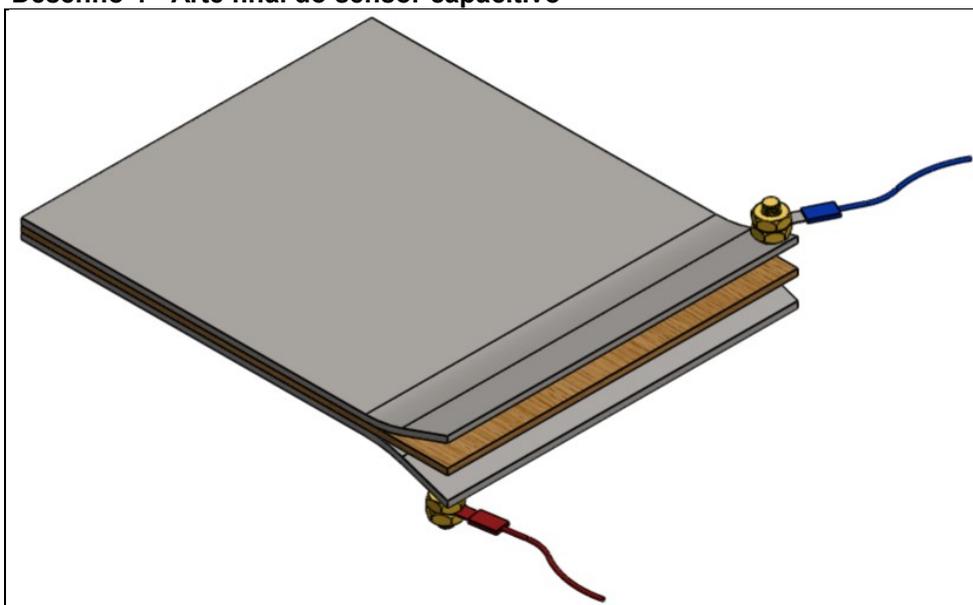
Fonte: O autor

3.1.3 Caracterização Física do Sensor

O sensor capacitivo pode ser visualizado nos desenhos 3 e 4 onde é apresentado a sua caracterização física composto pelas placas planas e o corpo de prova inserido entre essas.

Desenho 3 - Implementação do sensor capacitivo

Fonte: Autoria própria

Desenho 4 - Arte final do sensor capacitivo

Fonte: Autoria própria

4 MATERIAIS E MÉTODOS

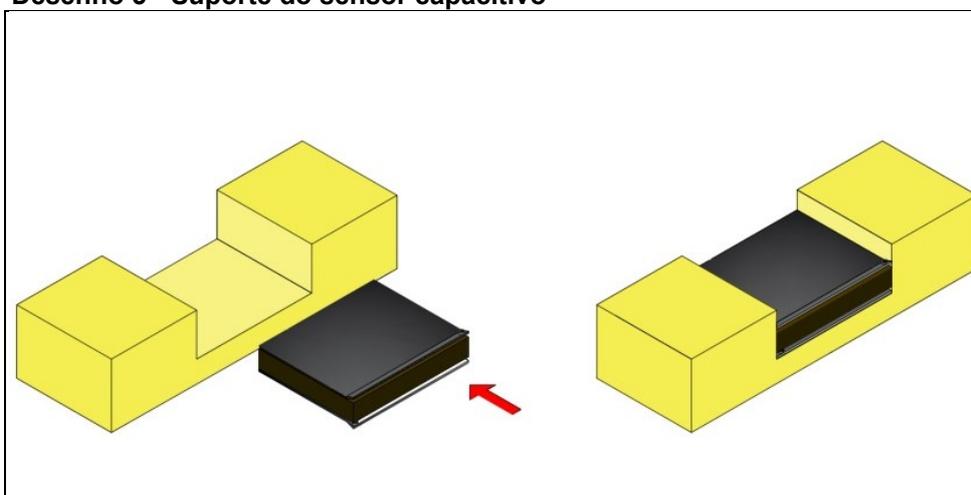
Este capítulo apresenta os materiais e os métodos utilizados para se obter e registrar os valores dos sinais elétricos fornecido pela ponte em corrente alternada e aquisitados em três diferentes sistemas. Os sinais elétricos, serão utilizados como comparação entre os diferentes níveis de umidades dos corpos de prova.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Sistema de Ensaio

Para as análises, o sensor capacitivo foi acomodado e fixado em um suporte confeccionado em um material refratário e isolante elétrico que auxilia na isolação do sensor com o meio externo, eliminando possíveis interferências elétrica. Além da isolação, o suporte funcionou como uma matriz para os corpos de prova, para que estes sejam analisados de forma padronizada preenchendo toda a área das placas planas. O Desenho 5, apresenta o sistema de ensaio utilizado para analisar os corpos de prova da espécie de madeira escolhida. O sensor foi instalado em um suporte de material isolante onde a placa inferior foi fixada movendo-se apenas a placa superior. Com esse sistema o corpo de prova analisado sempre assumira uma posição fixa entre as placas do sensor.

Desenho 5 - Suporte do sensor capacitivo



Fonte: Autoria própria

4.1.2 Confeção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram confeccionados em um total de 21 amostras com medidas de 115 x 110 x 2 mm como ilustrado no Desenho 6.



Fonte: Autoria própria

4.1.3 Dispositivo Auxiliar de Comparação

Para auxiliar na análise dos dados registrados e atuar como referência, foi utilizado um dispositivo eletrônico com capacidade tecnológica de registrar o valor do teor de umidade em madeiras pelo método da resistência elétrica da madeira. O dispositivo da marca *Hidromette Compact* mede umidade em madeiras e seus derivados. A indicação da umidade refere-se a uma temperatura da madeira a 20 °C. O dispositivo de medida, abrange valores de umidade de madeira na área de 5 - 20%. A Figura 20, apresenta o modelo utilizado na leitura do teor de umidade que auxiliou na comparação do teor de umidade dos corpos de prova quando as análises foram realizadas utilizando-se o osciloscópio como sistema de aquisição de dados. O objetivo da utilização desse dispositivo, é certificar-se que a umidade dos corpos de prova estão variando e com a variação registrada, realizar uma comparação da variação do sinal elétrico obtido.

Figura 20 - Medidor eletrônico



Fonte: <http://www.bercu.be>

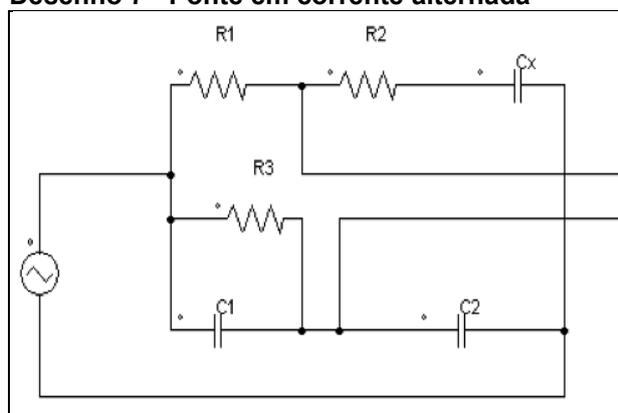
Para validação do sensor capacitivo, foi necessário realizar a sua integração aos seguintes dispositivos:

- Sistemas eletrônico de condicionamento de sinais;
- Dispositivo gerador de sinais e funções para a alimentação elétrica;
- Sistema de aquisição de dados.

4.1.4 Condicionamento de Sinais

A função do sistema de condicionamento de sinais é capturar os dados das propriedades elétrica fornecido pelos corpos de prova. O sistema de condicionamento implementado, é uma ponte balanceada em corrente alternada (VCA). O Desenho 7, apresenta a forma construtiva do sistema de condicionamento de sinais onde C_x representa o sensor capacitivo.

Desenho 7 - Ponte em corrente alternada



Fonte: Adaptado, (BRAGA, 1996)

A equação utilizada para encontrar a reatância do capacitor desconhecido (C_x) e os valores dos resistor e assim balancear a Ponte, é apresentado na Equação 47.

$$C_x = \frac{1}{2\pi fC}$$

Onde:

C_x = Reatância do componente capacitivo desconhecido;

f = Frequência da tensão aplicada pelo gerador de funções;

C = Capacitância conhecida (C2 e C3).

4.1.5 Gerador de Sinais

O dispositivo gerador de sinais e funções utilizado, é um modelo VC 2002 da marca Politem como apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Gerador de funções



Fonte: Manual Politem

O gerador de funções é um aparelho eletrônico utilizado para gerar sinais elétricos de diferentes formas de onda como senoidal, quadrada e dente de serra. A frequências podem ser ajustas assumindo valores em Hz (*hertz*) até MHz

(*Mega Hertz*) com amplitude de tensão que pode ser ajustada conforme a necessidade. As principais características desse dispositivo são apresentadas abaixo:

- Formas de Onda: Senoidal, Quadrada e Triangular;
- Faixa de Frequência: 0.2Hz a 2MHz em 7 faixas;
- Estabilidade em Frequência: $\pm 0.1\%$ / min.;
- Impedância de Saída: $50\Omega \pm 10\%$;
- Amplitude de Saída: 2Vpp a 20Vpp em aberto; 1Vpp a 10Vpp com carga;
- Distorção da Onda Senoidal: $< 2\%$ (10kHz, 5Vpp);
- Base de tempo: A cristal de quartzo com temperatura compensada (TCXO), 12MHz;
- Estabilidade da Base de Tempo: $\pm 50\text{PPM}$;
- Tempo de *Gate*: 1 segundo;
- Precisão: $\pm (20\% + 1D)$;
- Atenuação: 20dB e 40dB;

4.2 METODOS

Nesse trabalho, a metodologia utilizada para coletar e registrar a variação das propriedades elétrica da madeira foram:

- Saturar os corpos de prova em um recipiente com água a uma temperatura ambiente de 21°C com água até adquirir a estabilidade do peso de massa.
- Ajustar o gerador de sinais com frequência obtida pela equação 47 e nível de tensão elétrica que facilite a sua visualização;
- Com os corpos de prova saturados, realizar leitura do peso da massa e da medida do sinal elétrico fornecido pelo sistema de condicionamento e aquisição de sinais (Ponte e osciloscópio).
- Realizar três processos de secagem repetindo o registro das medidas realizadas no processo anterior.

4.2.1 Processo de Secagem dos Corpos de Prova

O processo de secagem foi realizado em uma estufa de laboratório marca DELEO modelo DL-SED 42L com controle automático de temperatura e um sistema de circulação forçada de ar no seu interior. O modelo pode ser visualizado na Fotografia 1.

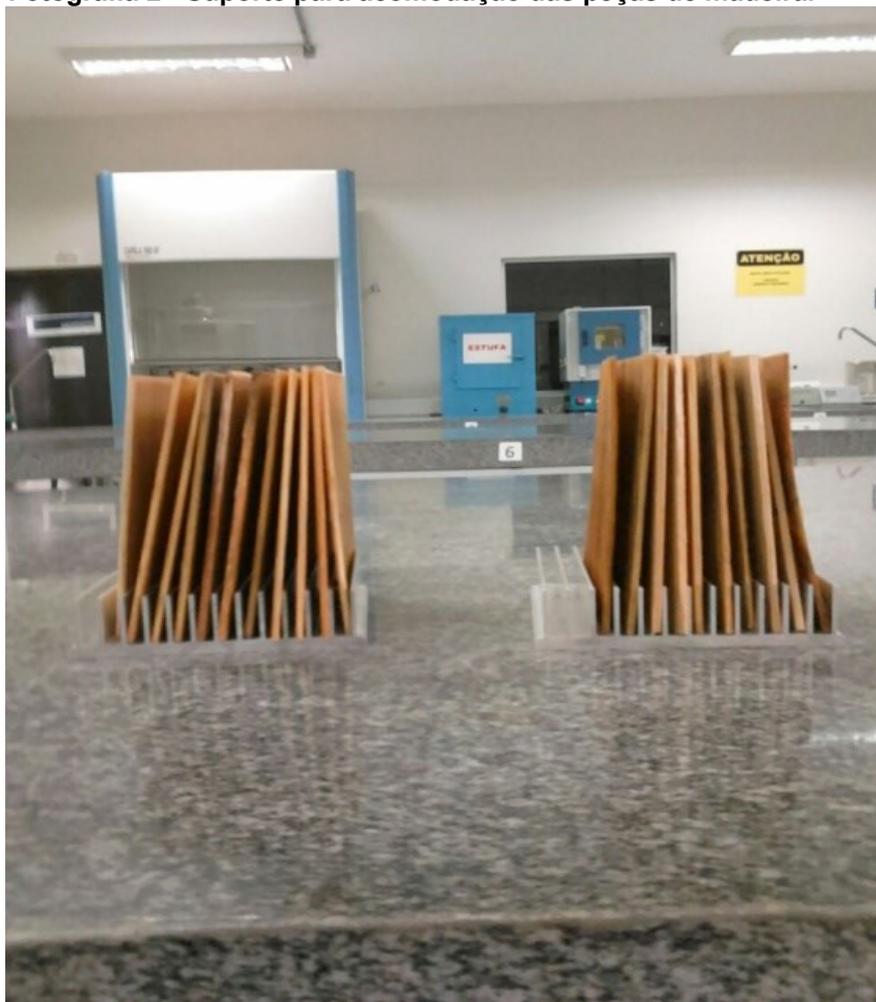
Fotografia 1 - Estufa marca DELEO modelo DL-DED 42L



Fonte: Autoria própria

O *setpoint* de temperatura foi de 105 °C conforme apresentado em GALVÃO; JANKOWSKY (1985). As peças foram acomodadas em um suporte para facilitar a circulação do ar quente por toda a sua área. Foram utilizados dois suportes idênticos como apresentado na Fotografia 2.

Fotografia 2 - Suporte para acomodação das peças de madeira.



Fonte: Autoria própria

O processo de secagem dos vinte e um corpos de prova teve o seguinte procedimento:

- Numerar os corpos de prova;
- Inserir os corpos de provas acomodados nos suportes para o interior da estufa;
- Retirar um grupo de 5 peças a cada 1,5 h, realizar as medições de peso, variação de tensão elétrica da ponte e retornar os corpos para continuar a secagem;
- Garantir que todos corpos de prova sejam expostos a temperatura de 105 °C por 6,5 h no interior da estufa.

Para auxiliar no registro de massa desde a saturação, processo de secagem e madeira seca foi utilizado uma balança eletrônica de precisão de marca OHAUS Adventurer modelo ARC 120 como apresentado na Fotografia 3.

Fotografia 3 - Balança eletrônica de precisão.



Fonte: Autoria própria

O formato adotado para registrar as medidas pode ser visualizado no Quadro 1.

Quadro 1- Modelo do registro dos valores coletados

| CORPO DE PROVA 1 | | | | |
|------------------------|------|-------------------|----------------------------|-----------------|
| | Peso | Medidor Resistivo | Varição de Tensão da Ponte | Teor de Umidade |
| 1ª medida (peça úmida) | | | | |
| 2ª medida | | | | |
| 3ª medida | | | | |

Fonte: Autoria própria

5 COLETA DE DADOS

Os dados foram coletados de três diferentes sistemas de aquisição de dados: osciloscópio, integração Arduino e software Matlab e integração Arduino e display LCD 16 x 2 caracteres.

5.1 OSCILOSCÓPIO

O sensor capacitivo implementado, forneceu sinais analógico que foram adquiridos por um Osciloscópio Digital marca Minipa modelo MO-2061 que auxiliou nos registro da variação da tensão elétrica nos ramos da Ponte de *Schering*. O dispositivo utilizado, pode ser visualizado na Figura 37.

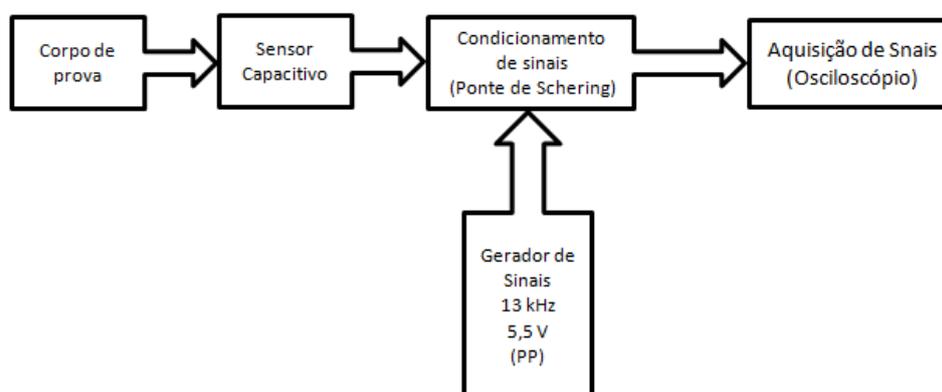
Figura 22 - Osciloscópio Digital marca Minipa modelo MO-2061



Fonte: <http://www.minipa.com.br/osciloscopios/osciloscopios-digitais>

A quantidade de corpos de provas analisados foram de um total de 21 peças. A Figura 38, ilustra em blocos a configuração do sistema implementado para capturar os dados fornecidos pelos corpos de prova.

Figura 23 - Representação em blocos do dispositivo capacitivo



Fonte: O autor.

A frequência ajustada no dispositivo gerador de sinais foi de 13 kHz com amplitude de tensão elétrica de 5,5 Vpp.

Os resultados coletados podem ser visualizados nos Quadros 3, 4 E 5 onde as cores sinalizam a que temperatura foi realizado as leituras nos corpos de prova como apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Cores que identificam as leituras dos corpos de prova

| | Tempo de aquecimento a 105 °C |
|--|----------------------------------|
| | 1,5 h |
| | 3 h |
| | 4,5 h |
| | 6 h |
| | 6,5 h |
| | |

Fonte: Autoria própria

Quadro 3 - Registros dos dados dos corpos de prova

| Corpo de prova 1 | | | | Corpo de prova 2 | | | | Corpo de prova 3 | | | |
|------------------------|-------|-------------------|-----------------------------|------------------------|------|-------------------|-----------------------------|------------------------|-------|-------------------|-----------------------------|
| | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte | | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte | | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte |
| 1ª medida (Peça umida) | 24,8 | 40 | 0,98 | 1ª medida (Peça umida) | 29,3 | 40 | 1,01 | 1ª medida (Peça umida) | 26,2 | 38,6 | 0,98 |
| 2ª medida | 13,5 | 24,5 | 0,42 | 2ª medida | 19,5 | 23,8 | 0,81 | 2ª medida | 19,3 | 31 | 0,78 |
| 3ª medida | 13,6 | 23 | 0,42 | 3ª medida | 13,5 | 23 | 0,63 | 3ª medida | 14,63 | 22,8 | 0,62 |
| Corpo de prova 4 | | | | Corpo de prova 5 | | | | Corpo de prova 6 | | | |
| | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte | | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte | | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte |
| 1ª medida (Peça umida) | 25,2 | 32,6 | 0,98 | 1ª medida (Peça umida) | 28,4 | 41 | 0,98 | 1ª medida (Peça umida) | 28,7 | 33 | 0,99 |
| 2ª medida | 18,3 | 27 | 0,84 | 2ª medida | 17 | 30,6 | 0,82 | 2ª medida | 14,5 | 23,8 | 0,63 |
| 3ª medida | 13,36 | 22,5 | 0,6 | 3ª medida | 10,2 | 22,7 | 0,65 | 3ª medida | 14,46 | 22,8 | 0,62 |

Fonte: Autoria própria.

Quadro 4 - Registros dos dados dos corpos de prova

| Corpo de prova 7 | | | | Corpo de prova 8 | | | | Corpo de prova 9 | | | |
|------------------------|-------|-------------------|-----------------------------|------------------------|-------|-------------------|-----------------------------|------------------------|-------|-------------------|-----------------------------|
| | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte | | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte | | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte |
| 1ª medida (Peça umida) | 22,2 | 42,5 | 0,96 | 1ª medida (Peça umida) | 27,2 | 43 | 0,96 | 1ª medida (Peça umida) | 27 | 41,3 | 0,97 |
| 2ª medida | 11,05 | 23,6 | 0,63 | 2ª medida | 7,61 | 23,8 | 0,74 | 2ª medida | 10,17 | 23,8 | 0,67 |
| 3ª medida | 11,2 | 22,6 | 0,62 | 3ª medida | 7,67 | 22,8 | 0,63 | 3ª medida | 10,38 | 22,8 | 0,63 |
| Corpo de prova 10 | | | | Corpo de prova 11 | | | | Corpo de prova 12 | | | |
| | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte | | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte | | Peso | Medidor Resistivo | Variação de tensão na Ponte |
| 1ª medida (Peça umida) | 28,5 | 39,5 | 0,99 | 1ª medida (Peça umida) | 26,6 | 41 | 0,98 | 1ª medida (Peça umida) | 27,4 | 35 | 0,98 |
| 2ª medida | 10,74 | 23,8 | 0,63 | 2ª medida | 10,87 | 23,7 | 0,77 | 2ª medida | 9,13 | 23,4 | 0,77 |
| 3ª medida | 10,87 | 22,7 | 0,63 | 3ª medida | 11,05 | 22,5 | 0,66 | 3ª medida | 9,44 | 22,8 | 0,65 |

Fonte: Autoria própria

Quadro 5 - Registros dos dados dos corpos de prova

| Corpo de prova 13 | | | | Corpo de prova 14 | | | | Corpo de prova 15 | | | |
|------------------------|-------|------------------|-----------------------------|------------------------|-------|------------------|-----------------------|------------------------|------|------------------|-----------------------|
| | Peso | Medidor Resistiv | Variação de tensão na Ponte | | Peso | Medidor Resistiv | Variação de tensão na | | Peso | Medidor Resistiv | Variação de tensão na |
| 1ª medida (Peça umida) | 20,1 | 40,4 | 0,96 | 1ª medida (Peça umida) | 21,8 | 41 | 0,97 | 1ª medida (Peça umida) | 27,7 | 4 | 0,99 |
| 2ª medida | 9,89 | 23,2 | 0,77 | 2ª medida | 10,54 | 23 | 0,67 | 2ª medida | 7,86 | 23 | 0,7 |
| 3ª medida | 10,03 | 22,5 | 0,63 | 3ª medida | 10,66 | 22,3 | 0,66 | 3ª medida | 7,55 | 22,5 | 0,64 |
| Corpo de prova 16 | | | | Corpo de prova 17 | | | | Corpo de prova 18 | | | |
| | Peso | Medidor Resistiv | Variação de tensão na Ponte | | Peso | Medidor Resistiv | Variação de tensão na | | Peso | Medidor Resistiv | Variação de tensão na |
| 1ª medida (Peça umida) | 27,8 | 42,2 | 1 | 1ª medida (Peça umida) | 26,7 | 44 | 0,98 | 1ª medida (Peça umida) | 22,8 | 38 | 0,98 |
| 2ª medida | 8,4 | 22,5 | 0,63 | 2ª medida | 7,23 | 22,5 | 0,68 | 2ª medida | 10 | 22,8 | 0,68 |
| 3ª medida | 8,4 | 22,5 | 0,65 | 3ª medida | 7,23 | 22,5 | 0,63 | 3ª medida | 9,9 | 22,5 | 0,63 |
| Corpo de prova 19 | | | | Corpo de prova 20 | | | | Corpo de prova 21 | | | |
| | Peso | Medidor Resistiv | Variação de tensão na Ponte | | Peso | Medidor Resistiv | Variação de tensão na | | Peso | Medidor Resistiv | Variação de tensão na |
| 1ª medida (Peça umida) | 21,7 | 35 | 0,97 | 1ª medida (Peça umida) | 26,5 | 40 | 0,97 | 1ª medida (Peça umida) | 25,7 | 43,7 | 0,97 |
| 2ª medida | 11,27 | 23 | 0,63 | 2ª medida | 9,09 | 23 | 0,63 | 2ª medida | 8,01 | 22,5 | 0,63 |
| 3ª medida | 11,26 | 22,5 | 0,64 | 3ª medida | 9,09 | 22,5 | 0,63 | 3ª medida | 8,01 | 22,5 | 0,63 |

Fonte: Autoria própria

Com os dados registrados nos quadros, foram realizado os cálculos para identificar o teor de umidade dos corpos de prova quando em estado saturado e após o processo de secagem que durou 6 horas.

Tabela 3-Variação do teor de umidade após 6 horas de secagem

| Prova | Pu (g) | Ps (g) | U% (inicial) | u% (final) |
|-------|--------|--------|--------------|------------|
| 1 | 24,8 | 13,6 | 82,35 | 0,00 |
| 2 | 29,3 | 13,5 | 117,04 | 0,00 |
| 3 | 26,2 | 14,63 | 79,08 | 0,00 |
| 4 | 25,2 | 13,36 | 88,62 | 0,00 |
| 5 | 28,4 | 10,2 | 178,43 | 0,00 |
| 6 | 28,7 | 14,46 | 98,48 | 0,00 |
| 7 | 22,2 | 11,2 | 98,21 | 0,00 |
| 8 | 27,2 | 7,67 | 254,63 | 0,00 |
| 9 | 27,4 | 10,38 | 163,97 | 0,00 |
| 10 | 28,5 | 11,04 | 158,15 | 0,00 |
| 11 | 26,6 | 11,05 | 140,72 | 0,00 |
| 12 | 27,4 | 9,44 | 190,25 | 0,00 |
| 13 | 20,1 | 10,03 | 100,40 | 0,00 |
| 14 | 21,8 | 10,66 | 104,50 | 0,00 |
| 15 | 27,7 | 7,55 | 266,89 | 0,00 |
| 16 | 27,8 | 8,76 | 217,35 | 0,00 |

| | | | | |
|----|------|-------|--------|------|
| 17 | 26,7 | 7,65 | 249,02 | 0,00 |
| 18 | 22,8 | 10,44 | 118,39 | 0,00 |
| 19 | 21,7 | 11,43 | 89,85 | 0,00 |
| 20 | 26,5 | 9,6 | 176,04 | 0,00 |
| 21 | 25,7 | 8,23 | 212,27 | 0,00 |

Fonte: O autor

Onde:

P_u = Peso do corpo de prova saturado [g];

P_s = Peso do corpo de prova seco [g];

$U\%$ = Porcentagem de umidade com os corpos de prova saturado;

$u\%$ = Teor de umidade dos corpos de prova após o processo de secagem.

A Tabela 4, apresenta a variação de tensão fornecida pela Ponte em corrente alternada em função do teor de umidade para cada corpo de prova. Importante observa que apesar dos 21 corpos de prova ficar imersos em um recipiente com água pelo mesmo tempo, cada um apresentou um valor diferente de teor de umidade e conseqüentemente um valor diferente de amplitude do sinal elétrico.

Tabela 4 - Amplitude do sinal em função do corpo de prova saturado

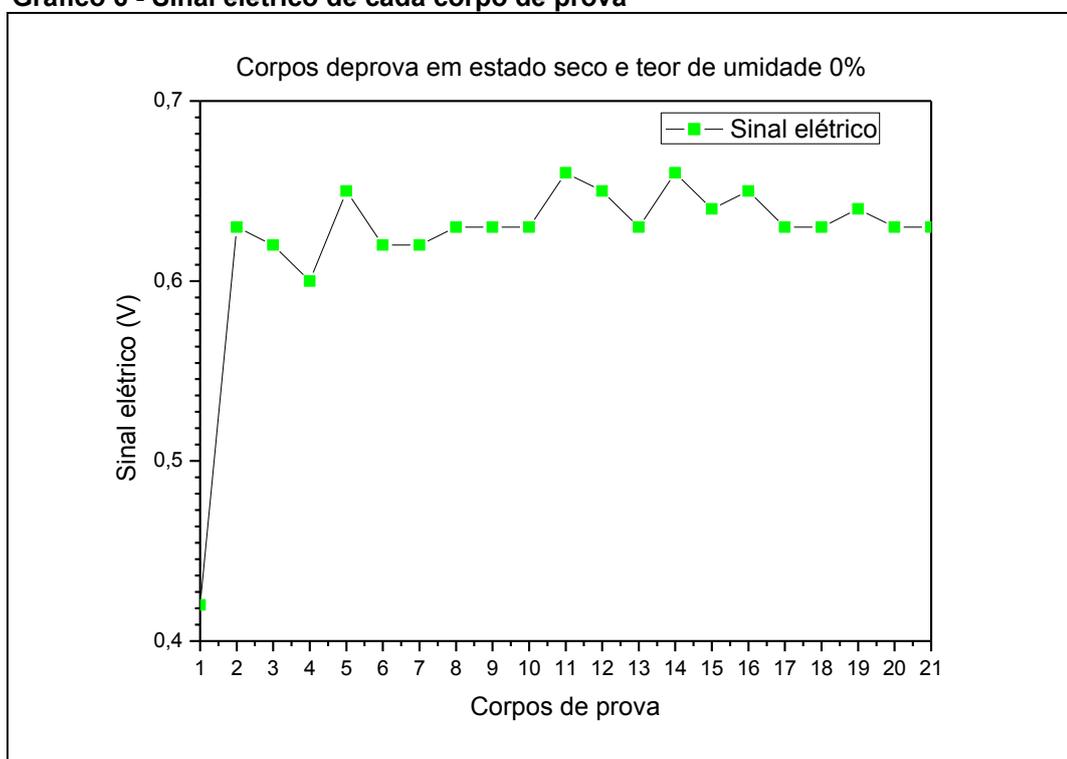
| Corpo de Prova | U% | Amplitude de Tensão (V) |
|----------------|--------|-------------------------|
| 1 | 82,35 | 0,98 |
| 2 | 117,04 | 1,01 |
| 3 | 79,08 | 0,98 |
| 4 | 88,64 | 0,98 |
| 5 | 178,43 | 0,98 |
| 6 | 98,48 | 0,99 |
| 7 | 98,21 | 0,96 |
| 8 | 254,63 | 0,96 |
| 9 | 163,97 | 0,97 |
| 10 | 158,15 | 0,99 |
| 11 | 140,72 | 0,98 |
| 12 | 190,25 | 0,98 |
| 13 | 100,40 | 0,96 |
| 14 | 104,50 | 0,97 |
| 15 | 266,89 | 0,99 |
| 16 | 217,35 | 1 |
| 17 | 249,02 | 0,98 |

| | | |
|----|--------|------|
| 18 | 118,39 | 0,98 |
| 19 | 89,85 | 0,97 |
| 20 | 176,04 | 0,97 |
| 21 | 212,27 | 0,97 |

Fonte: Autoria própria

Após realizar o processo de secagem, os corpos de prova apresentaram um valor de 0% de umidade como ilustrado na tabela 3. Os valores do sinal elétrico obtido para cada corpo de prova após ser exposto ao processo de secagem, pode ser visualizado no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Sinal elétrico de cada corpo de prova



Fonte: Autoria própria

5.2 INTEGRAÇÃO ARDUINO MATLAB

Com integração *Arduino Matlab*, o osciloscópio foi substituído como sistema de aquisição de sinais o que tornou a visualização dos sinais elétrico, mais prática em relação ao osciloscópio pois os níveis do sinal elétrico puderam ser visualizados com o auxílio de um computador onde foi possível registrar o teor de umidade dos corpos

de prova em função da amplitude do sinal elétrico apresentado. Com esse sistema, a coleta das informações geradas apresentou os seguintes dispositivos:

- Sensor capacitivo integrado a ponte em corrente alternada;
- Placa eletrônica Arduíno;
- *Software Matlab*.

5.2.1 Placa Eletrônica Arduíno

O Arduíno é um dispositivo eletrônico, baseado nas filosofias de software e hardware livres ou *open sources* e é indicado para a criação de protótipos de eletrônica que admite entradas de uma série de sensores ou chaves, e controla uma variedade de saídas físicas. Os projetos do Arduino podem ser independentes ou podem se comunicar com o seu software rodando em um computador onde pode-se desenvolver programas via IDE (*Integrated Development Environment*, ou *Ambiente de Desenvolvimento Integrado*) utilizando uma linguagem baseada em C/C++, sem a necessidade de equipamentos extras além de um cabo USB.

Para o presente projeto foi escolhido o modelo Arduino Uno que possui: porta USB para conexão com o computador e um conector *Jack* para alimentação externa. A placa Arduino Uno conta com 01 microcontrolador ATmega328P (fabricado pela empresa *Atmel*), 14 entradas e saídas digitais, 6 entradas analógicas, 1 oscilador de cristal de 16 MHz e pinos de alimentação com 3,3 V, 5 V e Terra (GND). A estrutura do Uno pode ser visualizada na Fotografia 4.

Fotografia 4 - Placa Arduino modelo Uno

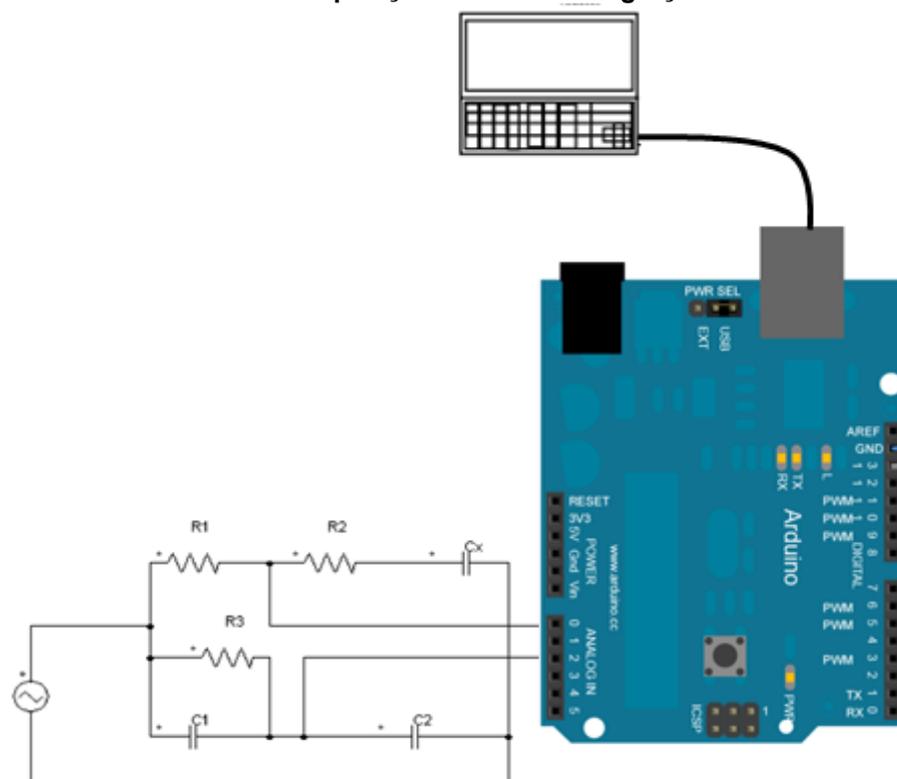
Fonte: Autoria própria

5.2.2 Monitoramento dos Dados Aquisitados.

Os dados aquisitados pela integração entre o *Matlab* e a placa eletrônica Arduino, serviram de parâmetros de comparação quando os corpos de prova se encontravam saturados e posteriormente passaram por um processo de secagem. Os sinais provenientes da ponte em corrente alternada foram conectados nas entradas analógicas do Arduino e com a implementação de um código fonte na área de script do *Matlab*, foi possível realizar a aquisição dos sinais que foram registrados por tabelas desenvolvidas pelo software na sua área de trabalho.

O Desenho 8, ilustra a composição do sistema para a segunda coleta de dados.

Desenho 8 - Sistema de aquisição de dados. Integração Arduino e Matlab



Fonte: Autoria própria

5.2.3 Registro dos Dados Aquisitados

Nessa fase, os procedimentos de saturação e secagem dos corpos de prova quando os valores do sinais elétrico foram aquisitados pelo osciloscópio, foram repetidos. Foram analisadas, outras frequências e amplitudes de tensão a ser ajustadas no gerador de sinais pois com a alteração no sistema de aquisição implementada pelo software Matlab e a placa Arduíno os valores utilizados o processo anterior se mostrou insatisfatórios para ser monitorados. Os novos valores aplicados na ponte em corrente alternada foi:

- Frequência de 2 kHz;
- Tensão de 6 Vpp.

Para a coleta de dados dos corpos de prova, foram aplicados dois diferentes métodos. A aplicação desses métodos, teve como propósito verificar a funcionalidade do sensor capacitivo e seus dispositivos integrado, quando os corpos de prova se encontrar em diferentes níveis de teor umidade e também quando os níveis de teor

de umidade, estiverem localizadas em diferentes posições do material analisado. Os métodos utilizados para se registrar a variação do sinal elétrico em função da variação de umidade foram:

- Registrar a amplitude do sinal elétrico e teor de umidade, quando o corpo de prova se encontrar em estado saturado;
- Registrar a amplitude do sinal elétrico e teor de umidade após o corpo de prova passar por um processo de secagem;
- Registrar a amplitude do sinal elétrico e teor de umidade, aplicando no canto superior esquerdo do corpo de prova uma quantidade de água;
- Registrar a amplitude do sinal elétrico e teor de umidade, aplicando no centro do corpo de prova uma quantidade de água;
- Iniciar um processo de secagem do corpo de prova saturado e registrar a amplitude do sinal elétrico e teor de umidade, com intervalos de tempo iguais a 5 minutos até que se obtenha a massa seca.

Os métodos citados acima se justificam pois identificar o teor de umidade em pequenas e diferentes áreas da madeira podem validar o sensor implementado como dispositivo apto ao projeto proposto nesse trabalho. Importante registrar que a cada aplicação de água, o corpo de prova sofreu um processo de secagem para retornar ao seu estado inicial de madeira seca onde foi registrado os dados obtidos pelo mesmo corpo de prova. Para saturar a madeira com água foi utilizado um segundo corpo de prova que ficou imerso em um recipiente com água por 24 horas.

Para registrar a variação da amplitude do sinal elétrico para cada método utilizado foram gerados gráficos. Os gráficos se encontram no Anexos I desse trabalho. Após passar por um processo de secagem, os registros do sinal elétrico iniciou como apresentado na Tabela 6.

Tabela 5 - Resultados obtidos através do corpo de prova 1.

| Peso de massa do corpo de prova (g) | Teor de umidade (%) | Amplitude do sinal elétrico (V) | Presença de umidade |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|
| 13,7 | 0,54 | 0,56 | Seco |

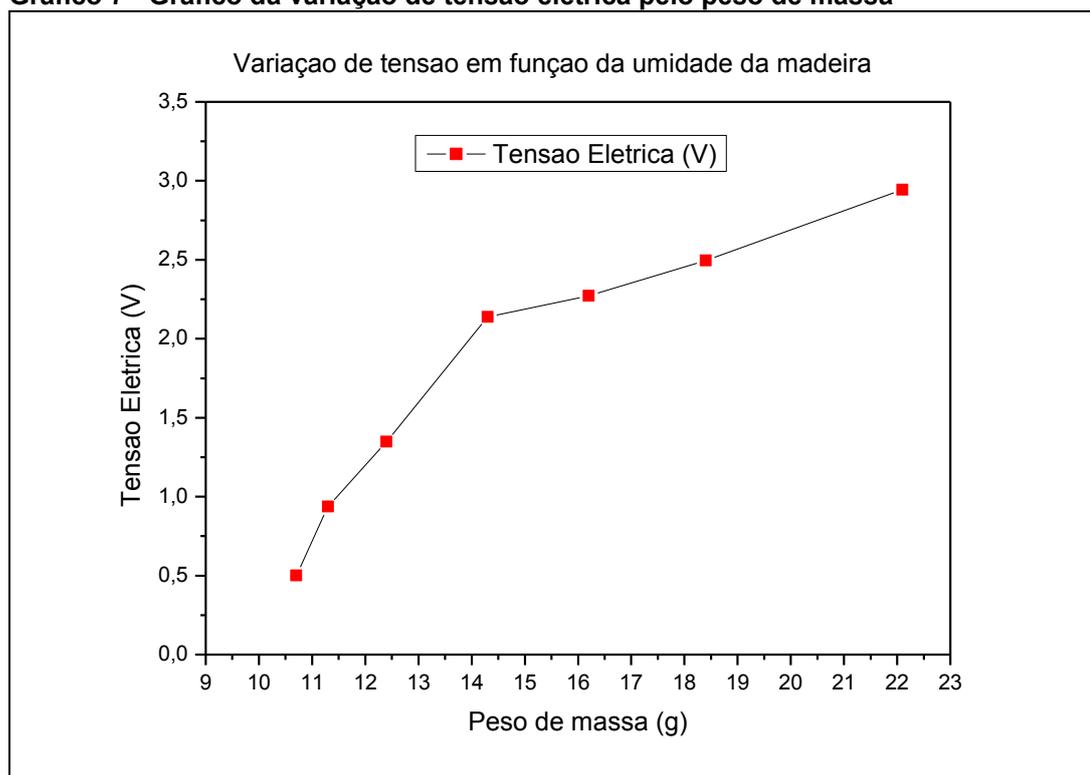
| | | | |
|------|-------|------|--|
| 15,3 | 12,28 | 1,98 | aplicado 1,6 g de água no canto superior esquerdo |
| 15 | 10,08 | 0,94 | Aplicado 1,3 g de água no centro do corpo de prova |

Fonte: Autoria própria

O passo seguinte, foi realizar registros de leituras utilizando outro corpo de prova. O processo teve as seguintes etapas:

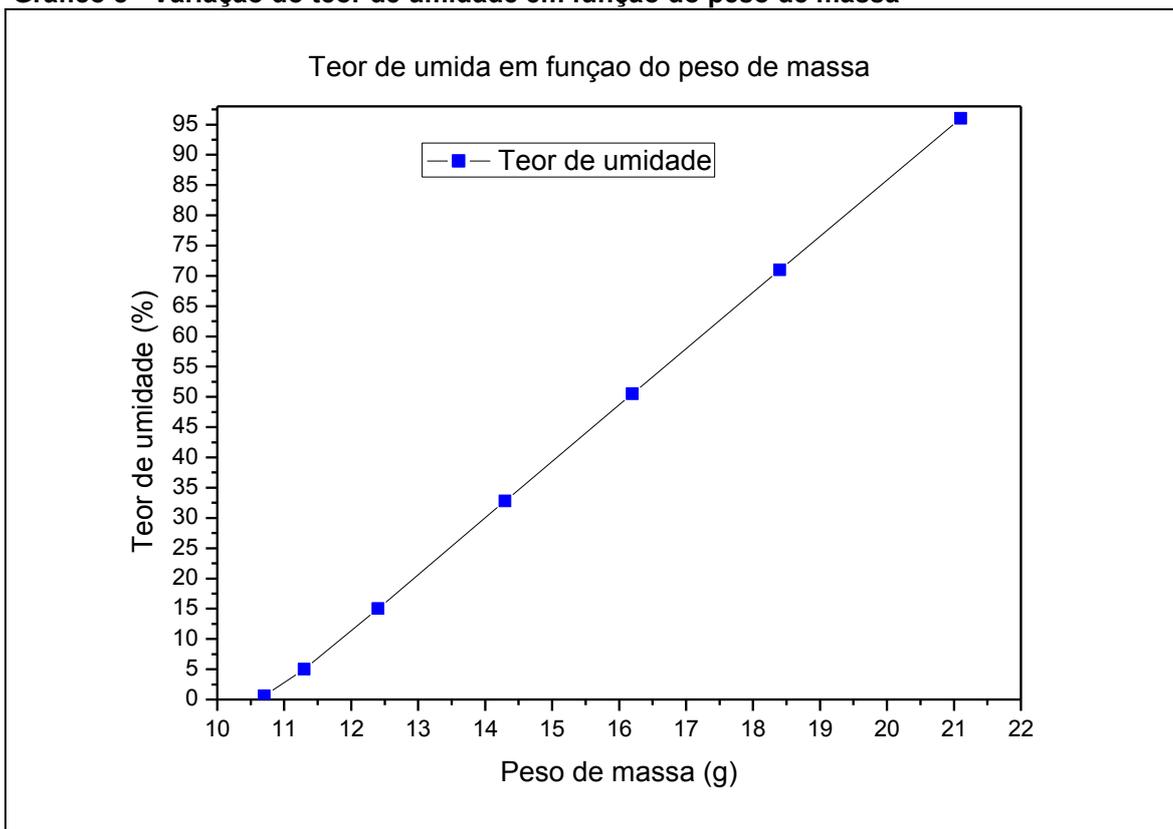
- Saturar o corpo de prova em um recipiente com água por 24 h;
- Realizar medida elétrica e cálculo do teor de umidade com o corpo de prova saturado;
- Expor o corpo de prova a um processo de secagem e registrar as leituras do teor de umidade e sinal elétrico em intervalos de tempo iguais a 5 minutos, até obter peso de massa seca.

O Gráfico 7, apresenta a variação do sinal elétrico em função da variação do peso de massa ocorrido durante o processo de secagem.

Gráfico 7 - Gráfico da variação de tensão elétrica pelo peso de massa

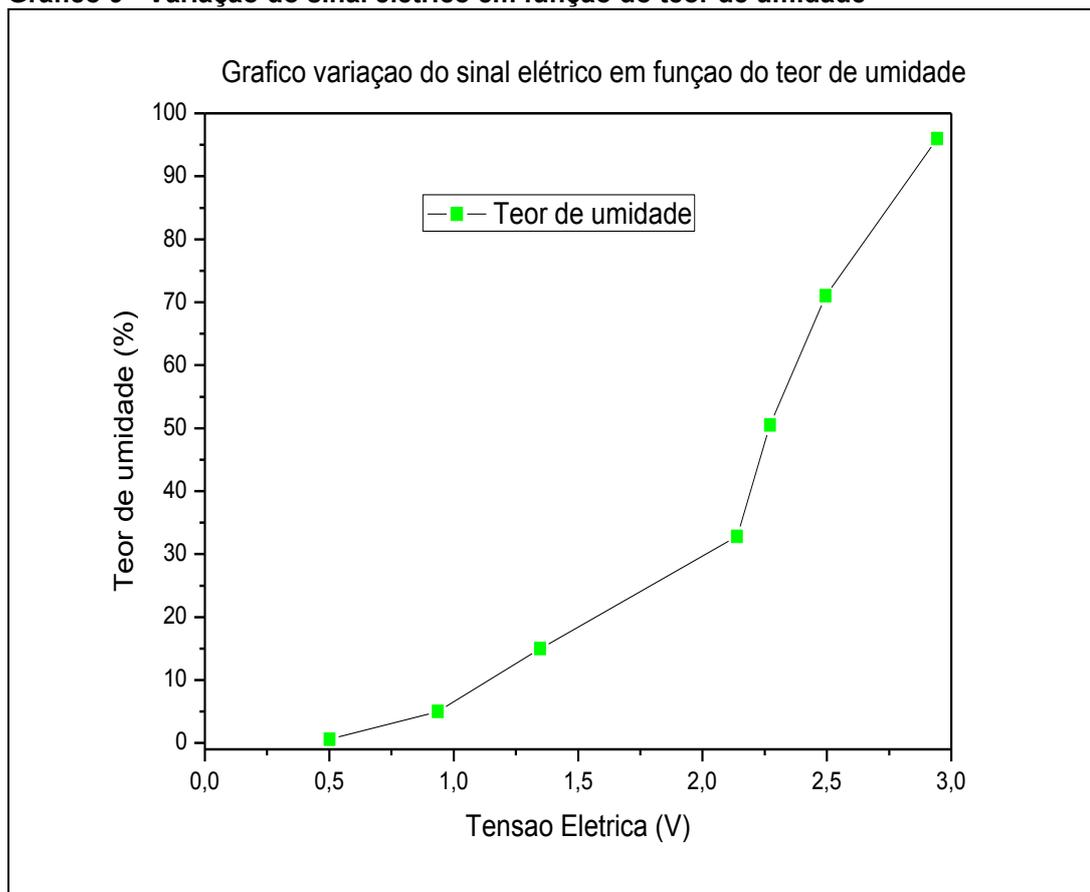
Fonte: Autoria própria

Na Figura 43, podemos visualizar o gráfico da variação do teor de umidade em função da variação do peso de massa.

Gráfico 8 - Variação do teor de umidade em função do peso de massa

Fonte: Autoria própria

No Gráfico 9, podemos analisar um comparativo entre o sinal da tensão elétrica obtido na ponte em corrente alternada e o teor de umidade do corpo de prova analisado.

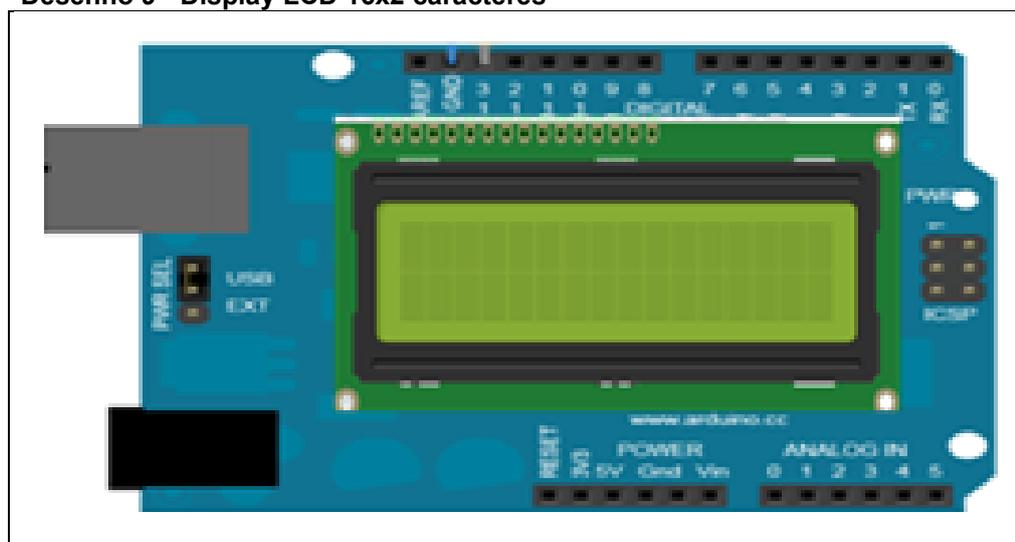
Gráfico 9 - Variação do sinal elétrico em função do teor de umidade

Fonte: Autoria própria

5.3 INTEGRAÇÃO ARDUINO DISPLAY LCD

Para essa terceira fase de análises dos dados fornecidos pelo sensor capacitivo, foi desenvolvido um sistema a nível de operação para a visualização dos dados fornecidos pelos corpos de prova em função da variação do teor de umidade. Os dispositivos utilizados anteriormente como o ponte em corrente alternada, a placa eletrônica Arduino e o gerador de sinais, permanecem. O dispositivo utilizado foi um display LCD 16x2 caracteres integrado a placa eletrônica Arduino como podemos visualizar no Desenho 9.

Desenho 9 - Display LCD 16x2 caracteres



Fonte: Autoria própria

Para realizar o tratamento dos sinais recebidos pelas entradas analógicas da placa eletrônica Arduino foi implementado um código fonte específico e embarcado no microcontrolador do dispositivo. Com a monitoração através de um display LCD, será possível visualizar *in loco* o estado em que o corpo de prova se encontra no momento da medição, sem a necessidade de um computador ou de mão de obra especializada pois as mensagens apresentadas serão de simples interpretação. Para que esse sistema de monitoramento seja eficiente é necessário implementar um modo de calibração das grandezas envolvidas.

5.3.1 Método de Calibração do Sistema

O objetivo de se instalar o sistema de monitoração através do display LCD é facilitar a interpretação do estado da madeira no momento da medição e otimizar o tempo de correção do teor de umidade caso esteja fora dos parâmetros definidos na calibração do sistema. Para calibrar o sistema optou-se pelos seguintes procedimentos:

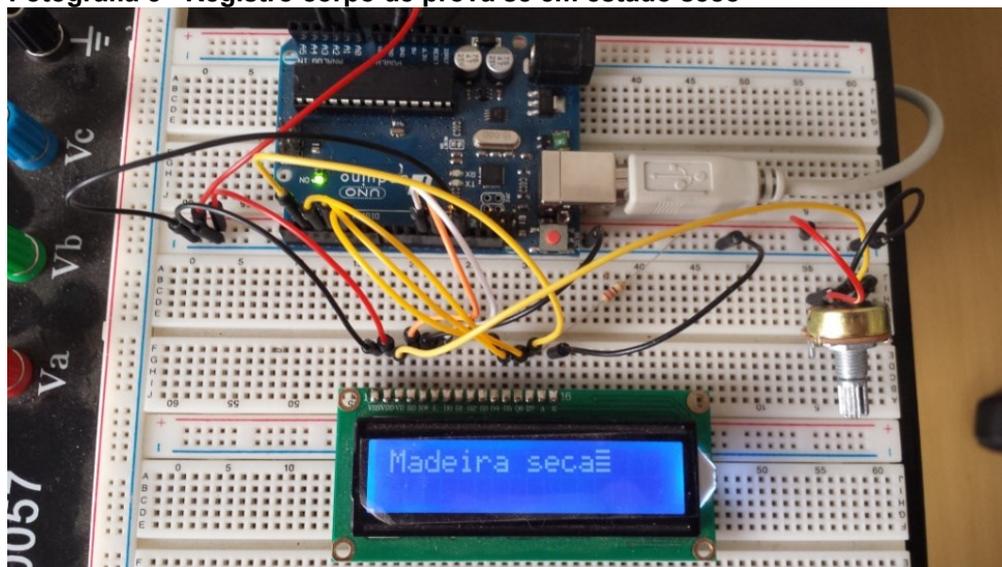
- Registrar o nível de tensão quando o corpo de prova se encontrar em estado saturado;
- Registrar o nível de tensão com o corpo de prova se encontrar em estado seco;
- Implementar um range entre o valor máximo e mínimo da tensão elétrica em função da variação de umidade do corpo de prova;

Os procedimentos utilizados para alterar o estado dos corpos de prova utilizados na integração *Matlab Arduino* foram repetidos como segue abaixo:

- Aplicar 2 g de água no canto superior esquerdo do corpo de prova;
- Aplicar 2 g de água no centro do corpo de prova;
- Saturar o corpo de prova por 24 h imersos em um recipiente com água;
- Iniciar um processo de secagem com intervalos iguais a 5 minutos e registrar a variação das grandezas envolvidas.

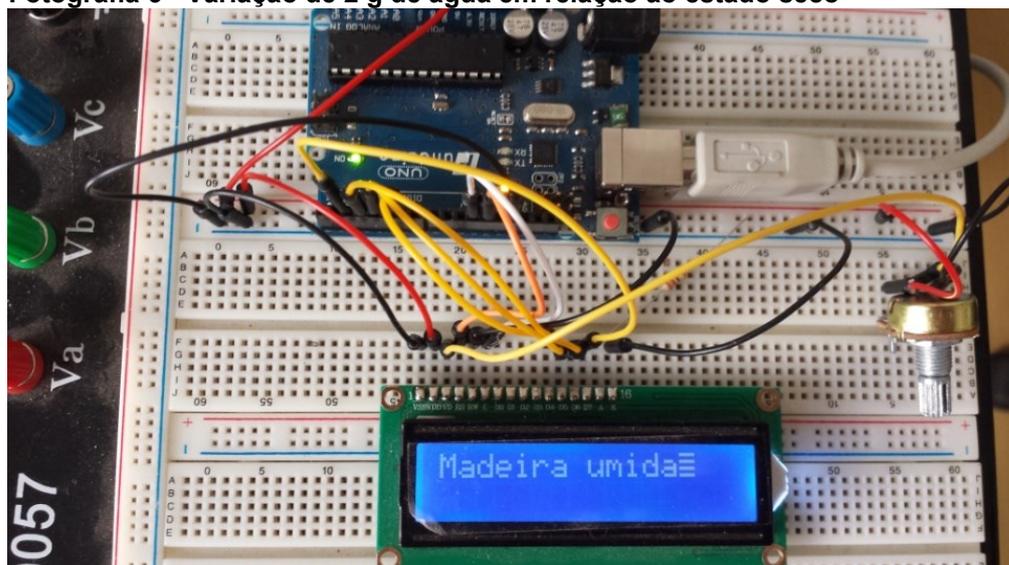
As Fotografias 5 e 6, apresentam o resultados registrado pelo display LCD. A relação entre o registro do corpo de prova em estado seco e úmido foi a aplicação de 2 a 3 g de água. Para avaliar o mínimo e o máximo de umidade, foi utilizado os dados fornecido através da integração do software Matlab e Arduino.

Fotografia 5 - Registro corpo de prova se em estado seco



Fonte: O autor.

Fotografia 6 - Variação de 2 g de água em relação ao estado seco



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÕES E MELHORIAS FUTURAS

Com base nos resultados obtido com as implementações desenvolvidas, pode-se concluir que o sensor pode auxiliar na identificação do teor de umidade em madeiras pois o mesmo apresentou valores diferentes de tensão elétrica para diferentes valor de peso de massa dos corpos de prova, não se limitando apenas a corpos de prova em estado saturado ou estado seco. No Anexo III desse trabalho, é possível visualizar a dinâmica do sensor quando o mesmo capturou valores de diferentes materiais como o vidro, a celulose seca, plástico e borracha.

Apesar de se utilizar um sistema de condicionamento de sinais resistivo/capacitivo, a variação da grandeza elétrica que se tornou possível de ser analisada foi a variação da ddp (diferença de potencial) gerada nos ramos da ponte para corrente alternada pois os cálculos realizados para identificar os componentes do dispositivo, foram efetuados para uma capacitância mais baixa ou seja no momento em que os corpos de prova se encontravam em estado seco e o mesmo dispositivo não se adaptou para registrar valores de capacitância maiores ou seja quando o material analisado se encontrava em estado saturado.

Conclui-se que o diferencial desse trabalho com outros trabalhos encontrados em artigos e dissertações é a sua capacidade de verificar o teor de umidade concentrado em pequenas áreas dos corpos de prova elaborados com a madeira de *Pinus Elliotti*.

Como melhorias futuras, pode-se sugerir as seguintes propostas: Instalar o dispositivo em uma linha contínua de produção, Identificar a constante dielétrica da madeira em função do estado, Implementar um dispositivo portátil para as análises realizadas nesse trabalho, Integrar um sistema de controle mais potente em relação ao Arduino, Apresentar a porcentagem de umidade da madeira no display LCD.

REFERÊNCIAS

BRAGA, N. C. **Pontes para Medidas de Capacitância**. Artlgo. 1996.

CELSO FOELKEL. **O Pinus como matéria-prima**. Artigo. 2005.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem Racional da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1985.

HALLIDAY, D. **Fundamentos de Física**. 8.ed. ed. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos, 2009. v. 3

JANKOWSKY, I. P.; GALINA, I. C. M. **Secagem de Madeiras**, 2013. Disponível em: <http://pimads.org/documento_atividades/Apostila_Secagem_de_Madeiras..pdf>. Acesso em: 12 dez. 2016

JOSÉ CARLOS OLIVEIRA SANTOS et al. **Estudo da Degradação Térmica de Óleos Lubrificantes Automotivos por Cromatografia Gasosa**. p. 6, 10 fev. 2005.

KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **Acultura do Pinus no Brasil**. São Paulo: Páginas & Letras, 2005.

MORÁN, A. V. **Manutenção Elétrica Industrial**. 2ed. ed. Salvador: VM, 2005.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da Madeira**. 4a Edição ed. Curitiba: FUPEF, 2005.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da Madeira**, nov. 2012.

NUSSENZVEIG, H. M. **Física I**. 1ed. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1997. v. 3

PATSKO, L. F. **Funcionamento e Utilização de Sensores**, dez. 2006. Disponível em: <<http://www.maxwellbohr.com.br/>>. Acesso em: 9 mar. 2016

RODRIGUES, W. **Determinação do Teor de Umidade em Madeiras por meio de Medidores Elétrico**. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, 1999.

SEARS, F. W. **Física III**. 10 ed ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2004.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros**. Sexta ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v. 2

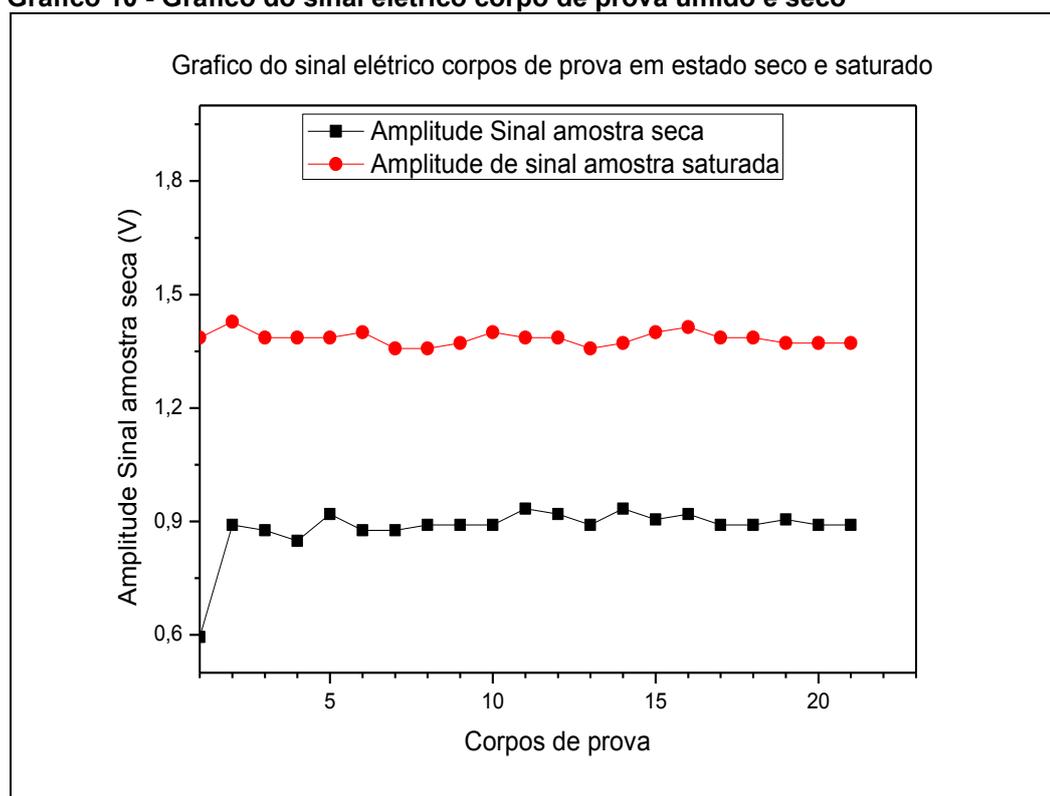
TSOUMIS, G. **Science and Technology of Wood Structure, Properties, Utilization**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

**ANEXO A - RESULTADOS OBTIDOS APLICANDO ÁGUA EM DIFERENTES
ÁREAS DOS CORPOS DE PROVA**

RESULTADOS OBTIDOS APLICANDO ÁGUA EM DIFERENTES ÁREAS DOS CORPOS DE PROVA

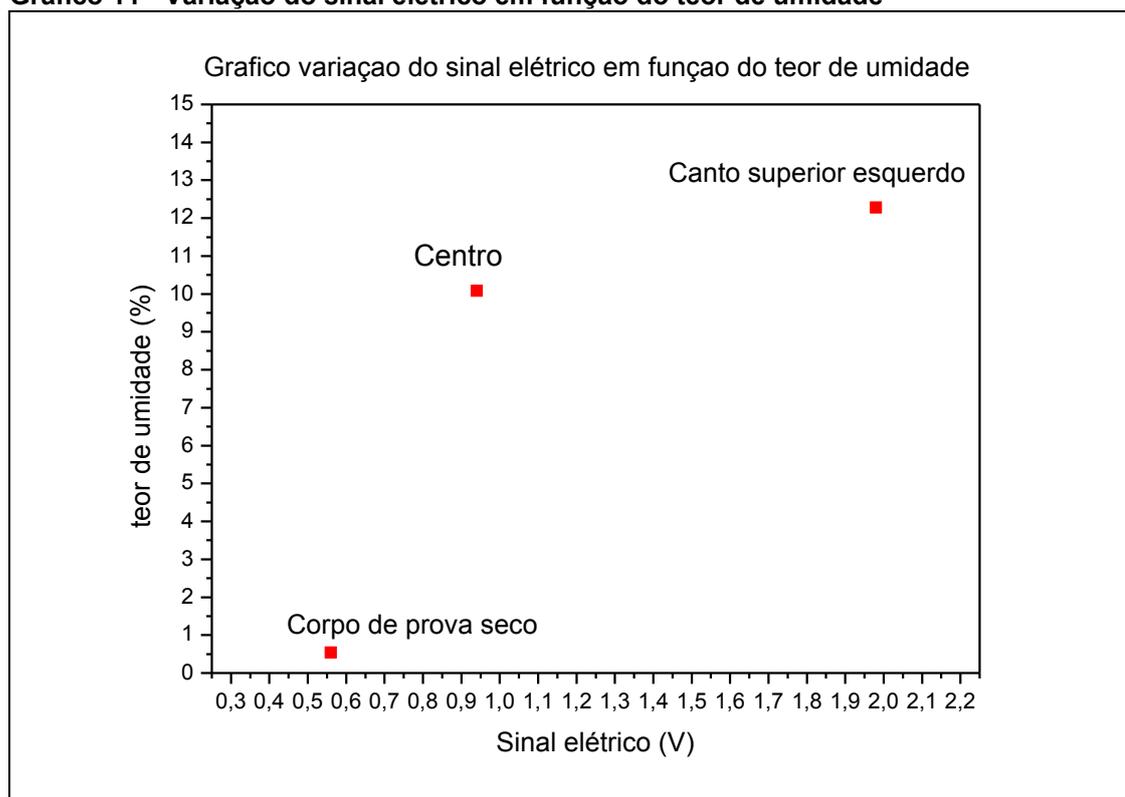
Os gráficos apresentados neste Anexo A, apresentam a variação do sinal elétrico em função da variação de umidade aplicada nos corpos de prova. Na figura 48, é apresentado a variação do sinal elétrico registrada no 21 corpos de prova quando se encontraram em estado saturado e seco.

Gráfico 10 - Gráfico do sinal elétrico corpo de prova úmido e seco



Fonte: Autoria própria

O gráfico 10, apresenta o gráfico onde é possível visualizar a variação do sinal elétrico quando o corpo de prova se encontrava seco e quando foi umedecido com água em diferentes área. Com essa análise, o sensor demonstra a sua capacidade de identificar pequenas área úmidas na área principal do corpo de prova. As área umedecidas foram: canto superior esquerdo do corpo de prova onde foi aplicado 1,6 g de água, e área central do corpo de prova onde foi aplicado 1,3 g de água.

Gráfico 11 - Variação do sinal elétrico em função do teor de umidade

Fonte: Autoria própria

ANEXO B - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

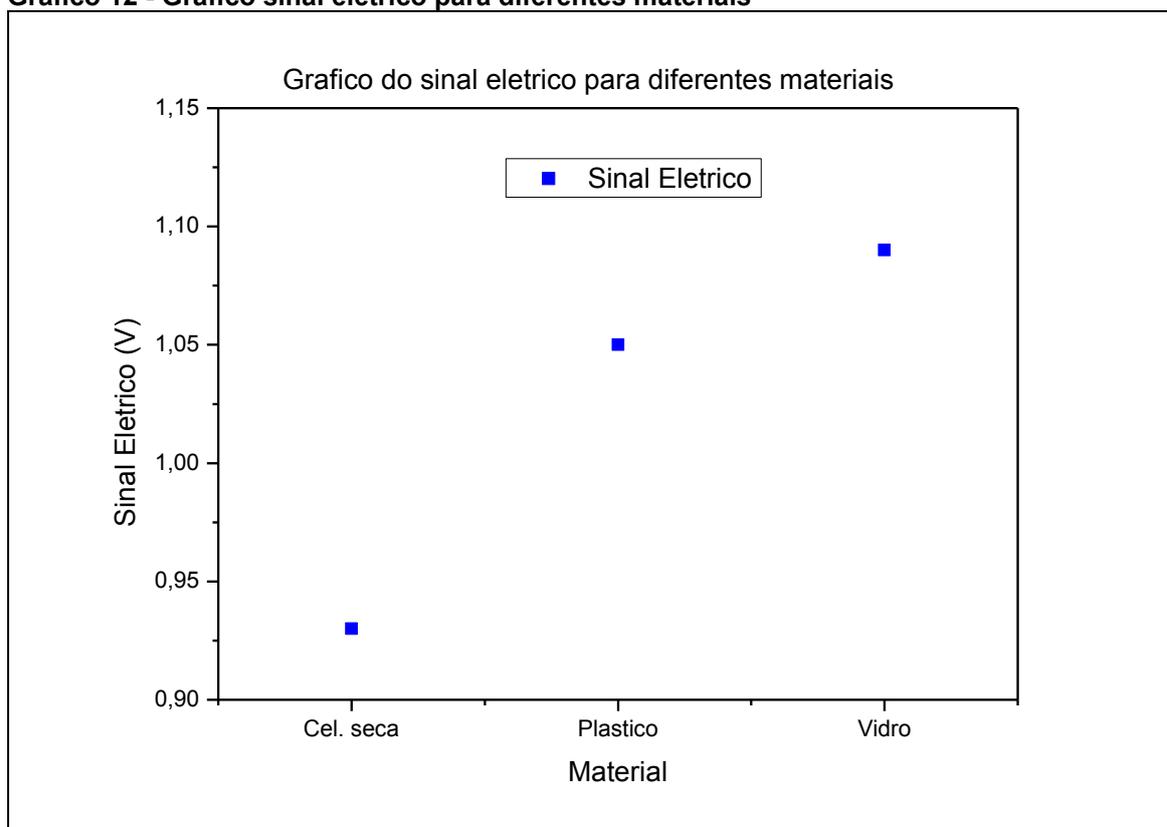
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesse anexo é apresentado os resultados experimentais com corpos de prova de diferentes materiais como:

- Celulose seca;
- Plástico;
- Vidro.

O objetivo de registrar o valor do sinal elétrico utilizando-se outros materiais como dielétrico entre as placas metálicas, foi para se certificar que o sensor capacitivo planejado e implementado, possui a capacidade de se adaptar a avaliar outros materiais e que a sua utilização pode ir mais além do que foi proposto e apresentado nesse trabalho.

Gráfico 12 - Gráfico sinal elétrico para diferentes materiais



Fonte: Autoria própria