



# ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



02 a 04  
de dezembro 2020

## DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR CAPACITIVO PARA DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE UMIDADE EM LÂMINAS DE MADEIRA

**Jéssimon Ferreira<sup>1</sup>**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**Frederic C. Janzen<sup>2</sup>**

Departamento Acadêmico de Eletrônica- Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**Giane G. Lenzi<sup>3</sup>**

Departamento Acadêmico de Engenharia Química - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**Angelo M. Tusset<sup>4</sup>**

Departamento Acadêmico de Matemática- Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**Resumo:** Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para detecção e mensuração dos níveis de umidade em lâminas de madeira de *Pinus* da espécie *Elliottii*. Sendo o dispositivo de sensoriamento desenvolvido considerando um sensor capacitivo. A capacitância é obtida por meio da energização de placas metálicas separadas pela lâmina atuando como isolante elétrico entre as placas metálicas. Desta forma a umidade é relacionada reatância capacitiva do sensor. Resultados experimentais do dispositivo eletrônico proposto são apresentados e demonstram a efetividade na mensuração do percentual de umidade nos corpos de prova. Considerando os resultados experimentais, o baixo custo da implementação do dispositivo este trabalho apresenta uma alternativa eficiente e viável para sensoriamento em tempo real da umidade de lâminas de madeira contribuindo assim com a setor madeireiro, e com o avanço da indústria 4.0.

**Palavras-chave:** Umidade de Madeira; Sensoriamento; Sistemas Capacitivos; Industria 4.0.

## DEVELOPMENT OF A CAPACITIVE SENSOR FOR DETERMINING THE MOISTURE LEVELS IN WOODEN

**Abstract:** This work presents the development of an electronic device for the detection and measurement of moisture levels in wooden sheets of *Pinus* of the species *Elliottii*. The sensing device being developed considering a capacitive sensor. Capacitance is obtained by energizing metal plates separated by the blade, acting as an electrical insulator between the metal plates. In this way, the humidity is related to the capacitive reactance of the sensor. Experimental results from the proposed electronic device are presented and demonstrate the effectiveness in measuring the percentage of units in the specimens. Considering the experimental results, the low cost of implementing the device, this work presents an efficient and viable alternative for real-time sensing

of the humidity of wood veneers, thus contributing to the wood sector, and to the advancement of industry 4.0.

**Keywords:** Wood Moisture; Sensing; Capacitive Systems; Industry 4.0.

## 1. Introdução

A madeira sempre ocupou lugar de destaque entre os materiais utilizados, e a secagem dessa material é de grande importância no processo de transformação da madeira em produtos (ANDRADE *et al.*, 2001). 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. Para Gonçalves e Costa (2010), as condições ambientais afetam a umidade da madeira que por sua vez afetam a suas propriedades mecânica e elástica.

Todos os tipos de madeira, após serem cortadas, apresentam 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).

A transformação racional da madeira bruta em produtos e bens de consumo requer a sua secagem pelas razões seguintes:

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

Para Jankowsky e Galina (2013), 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.

De modo geral, os produtos de madeira industrializados devem ser condicionados a umidades próximas das que deverão alcançar em seu uso. 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 *et al.*, 2005).

A adequada secagem da madeira serrada antes da sua transformação em bens e produtos, é reconhecidamente a fase mais importante de todo o processo que visa agregar valor ao produto final (JANKOWSKY, 2008). A movimentação da água do interior para a superfície, depende da temperatura, permeabilidade, densidade da madeira, espessura das peças e gradientes 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 propriedades importantes desse material (RODRIGUES, 1999).

O teor de umidade, é o resultado da relação entre o peso da água contida na madeira e o peso desta madeira realmente seca e geralmente, é 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 (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

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

Onde:

$U\%$  = Teor de umidade

$P_u$  = Peso umido da madeira

$P_s$  = Peso seco da madeira

Para definir o teor de umidade da madeira após essa passar por um processo de secagem pode ser utilizada a equação 2.

$$u\% = \frac{P_s(U\% + 100)}{P_u} - 100 \quad (2)$$

Onde:

$u\%$  = Teor de umidade final

$U\%$  = Teor de umidade inicial

$P_s$  = Peso seco

$P_u$  = Peso umido

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 inconvenientes:

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

O método onde se utiliza medidores elétricos, são baseados na resistência que a madeira oferece a passagem da corrente contínua elétrica. Os medidores elétricos, podem ser considerados eficientes, porém podem requerer paradas ou diminuição da velocidade das linhas de produção para que seja possível a coleta de dados. O inconveniente desse sistema é o processo de perfurar a superfície da madeira analisada, podendo com isso

danificar a área afetada. A figura 1, apresenta um modelo de leitor de umidade em madeiras pelo método de resistividade ( $\Omega$ ).



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

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

A resistência elétrica da madeira, é inversamente proporcional ao seu teor de água. Com base nessas informações, foi projetado e implementado um sensor capacitivo com capacidade de variar um sinal elétrico em função do teor de umidade das madeiras.

Neste trabalho é apresentado o projeto e a implementação de um dispositivo capacitivo capaz de identificar a variação de umidade em laminas de madeira de Pinus da espécie Elliottii. De forma específica, o dispositivo denominado como sensor capacitivo, foi integrado a um circuito eletrônico, que possibilita o condicionamento dos sinais elétricos capturados pelo sensor conforme a variação da umidade das lâminas de madeira.

## **2 Materiais e Métodos**

A utilização do sensor capacitivo, tem como objetivo analisar a variação de um sinal elétrico quando o material isolante no caso a madeira, sofrer variações do seu teor de umidade. O valor da capacitância ( $C$ ) é função da área das placas ( $A$ ), da distância entre as placas ( $D$ ) e da constante dielétrica ( $K$ ) do material existente entre as placas do capacitor (HALLIDAY, 2009), como apresentado na equação 3.

$$C = \frac{KA}{D} \quad (3)$$

O sensor capacitivo proposto, é um dispositivo elétrico que poderá ser utilizado em uma linha de produção e coletar dados relacionados as propriedades elétricas da madeira, sem se utilizar de um processo destrutivo e possibilita a medição da umidade sem necessidade de parada das máquinas ou a redução da velocidade delas.

O princípio de funcionamento, é similar a um capacitor comum utilizado nos meios elétrico e eletrônico. A variação de determinada condição ocasiona uma variação na capacitância do componente.

### **2.1 Desenvolvimentos do sensor**

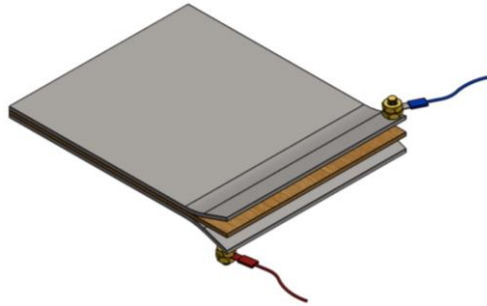
O sensor capacitivo, é composto por duas placas planas metálicas, com dimensões: 111 x 130 x 2 mm. Para facilitar a passagem das lâminas pelo sensor é considerado um ângulo da abertura entre as placas, conforme ilustra a figura 2.



**Figura 2 - Angulo de abertura da placa plana**  
 Fonte: O autor

## 2.2 Caracterizações física do sensor

O sistema capacitivo do sensor pode ser visualizado na figura 3 onde é apresentado a sua caracterização física composta pelas placas planas e a lâmina inserida entre elas.



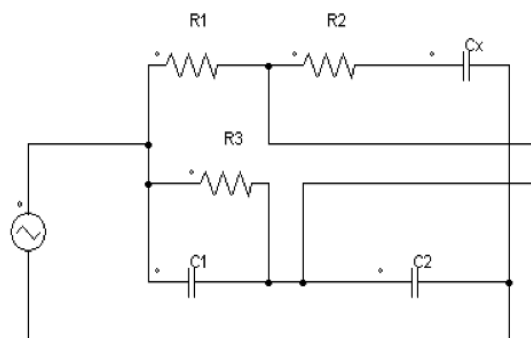
**Figura 3 – Sensor capacitivo para detecção de umidade.**  
 Fonte: O autor

Para aquisição dos dados do sistema capacitivo representado na figura 3, foi considerada a integração aos seguintes dispositivos:

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

O sistema de condicionamento de sinais é obtido da implementação de uma ponte RC, balanceada em corrente alternada (VCA), que tem como função fazer a aquisição dos dados das propriedades elétrica da lâmina de madeira.

A figura 4, apresenta a forma construtiva do sistema de condicionamento de sinais onde  $C_x$  representa o sensor capacitivo.



**Figura 4 - Ponte em corrente alternada**  
 Fonte: O autor

A equação utilizada para encontrar a reatância do capacitor desconhecido ( $C_x$ ) e os valores dos resistores e assim balancear a Ponte, é apresentada na equação 4.

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

Onde:

$C_x$  = Reatância do componente capacitivo desconhecido;

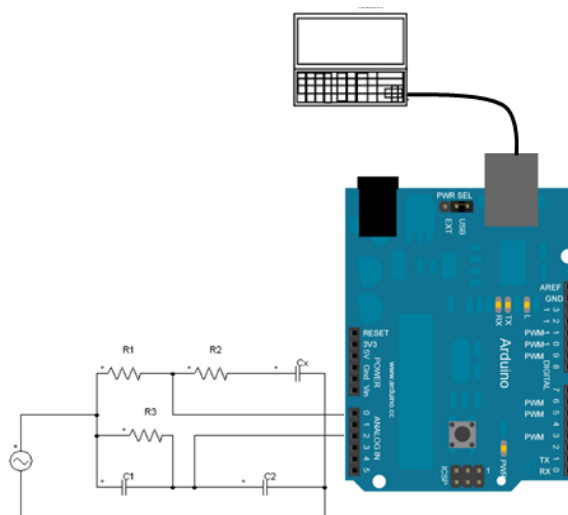
$f$  = Frequência da tensão aplicada pelo gerador de funções;

$C$  = Capacitância conhecida (C2 e C3).

### 2.3 Aquisição e análise dos dados

Para aquisição e análise dos sinais provenientes do sistema de condicionamento de sinais (Ponte em corrente alternada), suas saídas são conectadas nas entradas analógicas do microcontrolador Arduino que através de um cabo serial integrado ao software Matlab possibilita o tratamento dos dados adquirido.

A figura 5, ilustra a composição do sistema completo de coleta e análise de dados.



**Figura 5 - Sistema de aquisição de dados. Integração Arduino e Matlab e ponte**  
Fonte: O autor

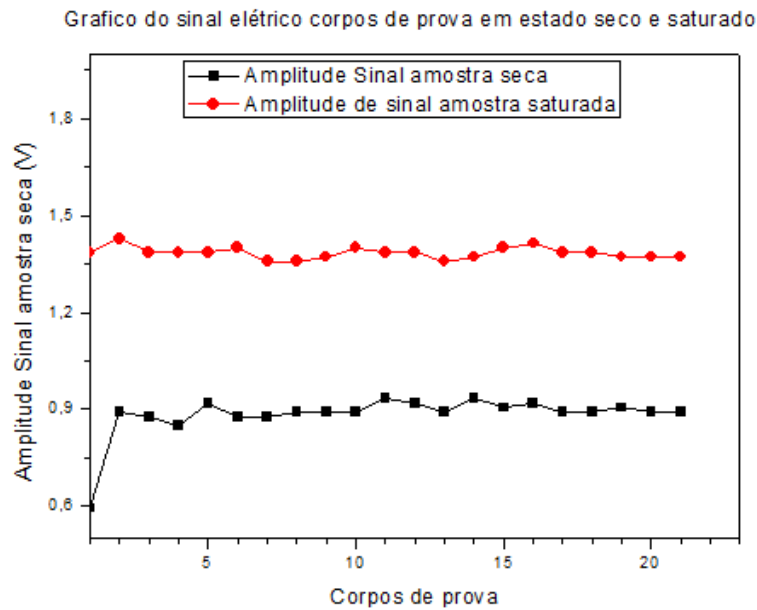
Para validação do sensor proposto foram considerado 21 corpos de prova com medidas de 115 x 110 x 2 mm, e a metodologia utilizada para coletar e registrar a variação das propriedades elétrica da madeira foram:

- 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 e nível de tensão elétrica que facilite a sua visualização do sinal elétrico;
- 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;
- Realizar o processo de secagem e registrar os novos valores de peso de massa e de sinal elétrico.

### 3 Resultados e Discussões

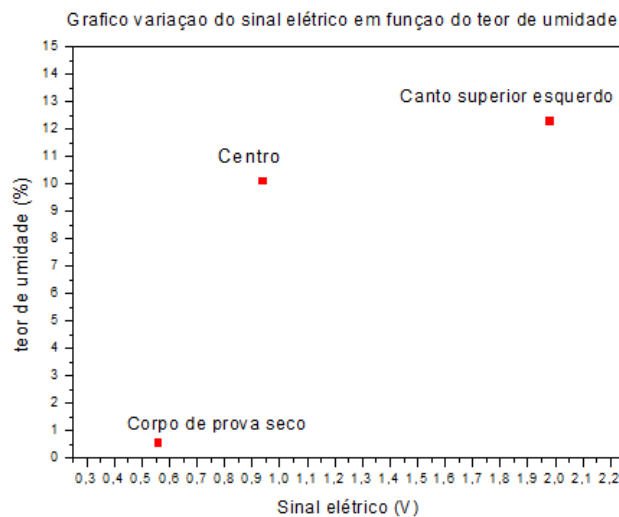
A figura 6, apresenta a variação do sinal elétrico de que foram registradas nos 21 corpos de prova quando se encontraram em estado saturado e seco. Observa-se na figura, que não houve uma uniformidade do sinal elétrico nos 21 corpos de prova. Tal fato pode ser

comprovado com a diferença de peso de massa de cada corpo de prova pois alguns absorveram mais água que outros.



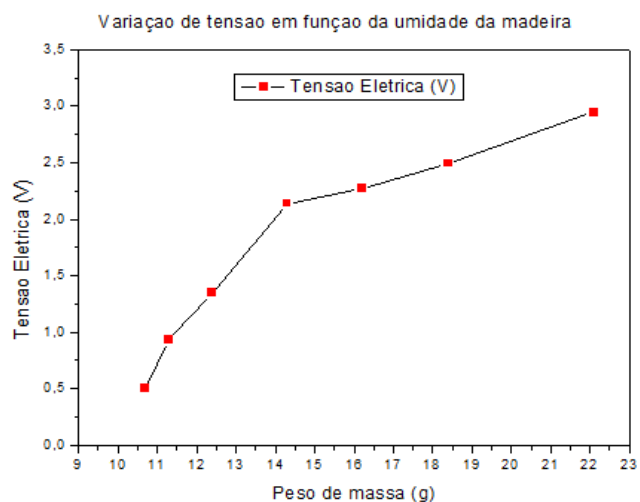
**Figura 6 - Variação do sinal elétrico (V) em função do teor de umidade do corpo de prova**  
**Fonte: O autor**

A figura 7, apresenta a variação do sinal elétrico (V) 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 áreas 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.



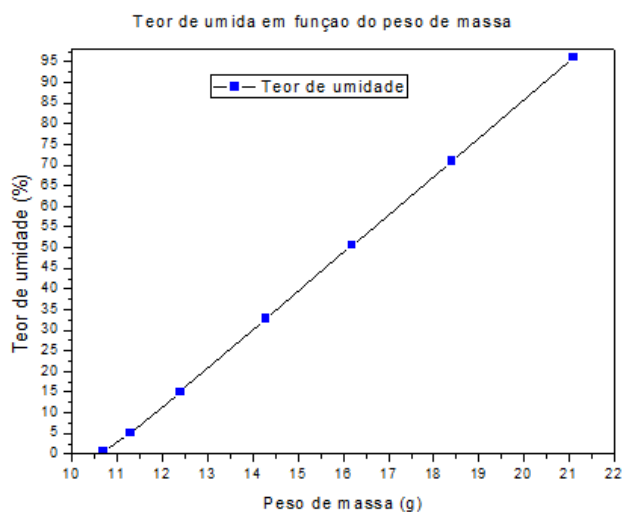
**Figura 7 - Corpo de prova umedecido em diferentes áreas**  
**Fonte: O autor**

A figura 8, apresenta a variação do sinal elétrico em função da variação do peso de massa ocorrido durante o processo de secagem.



**Figura 8 - Variação do sinal elétrico (V) em função do peso de massa**  
**Fonte: O autor**

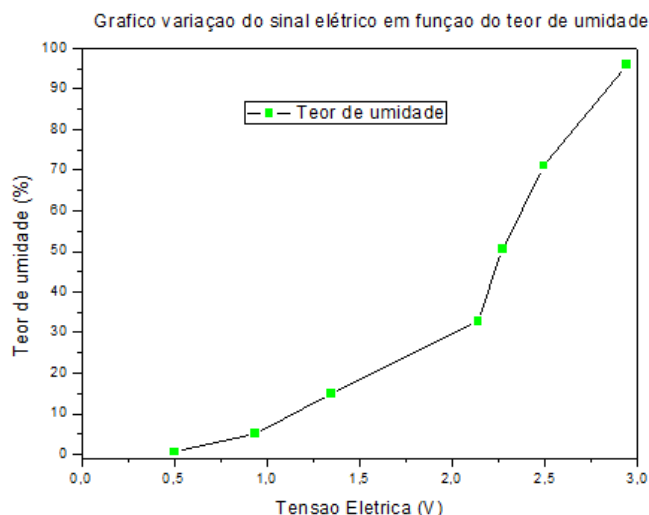
Na figura 9, pode-se visualizar a variação do teor de umidade em função da variação do peso de massa.



**Figura 9 - Variação do teor de umidade (%) em função do peso de massa**  
**Fonte: O autor**

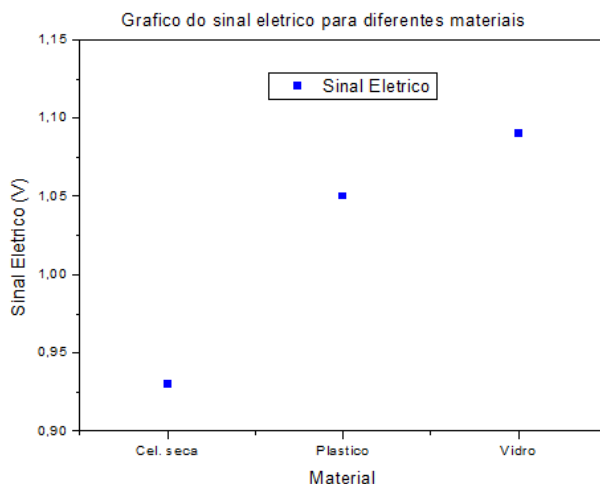
Na figura 10, são apresentados resultados comparativos entre o sinal da tensão elétrica obtido na ponte em corrente alternada e o teor de umidade do corpo de prova analisado.





**Figura 10 - Comparativo entre o teor de umidade do corpo de prova e o sinal elétrico obtido na ponte**  
**Fonte: O autor**

Na figura 11, é possível visualizar a dinâmica do sensor quando ele capturou valores, de diferentes materiais como: o vidro, a celulose seca e o plástico.



**Figura 11 - Valor do sinal elétrico (V) realizados com diferentes materiais**  
**Fonte: O autor**

Os resultados apresentados na figura 11 demonstra a robustez do sensor pois mesmo sendo projetado para madeira, possui a capacidade de avaliar outros materiais e que a sua utilização pode ir mais além do que foi proposto e apresentado nesse trabalho.

#### 4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o sensor é eficiente na determinação do teor de umidade em lâminas de madeiras. Demonstrou ser robusto apresentou valores diferentes de tensão elétrica para diferentes valores de peso de massa dos corpos de prova, não se limitando apenas a corpos de prova em estado saturado ou estado seco. 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. Os resultados apresentados, contribuem com a pesquisa sobre sensoriamento de umidade das lâminas de madeira pela capacidade do sensor proposto em verificar o teor de umidade concentrado em pequenas áreas, sem utilizar-se de um meio destrutivo ou que possa vir a danificar a superfície da área a ser realizada a leitura do teor de umidade.

## Referencias

ANDRADE, A. DE; JANKOWSKY, I. P.; DUCATTI, M. A. SCIENTIA FORESTALIS. **Grupamento de madeira para secagem convencional**, n. 59, p. 89, 2001.

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

GONÇALVES, R.; COSTA, O. A. L. Revista da Madeira. **Secagem da madeira utilizando ultra-som**, n. 125, 2010.

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

JANKOWSKY, I. P. Revista da Madeira. **Equipamentos e processos para secagem de madeira**, n. 115, 2008.

JANKOWSKY, I. P.; GALINA, I. C. M. **Secagem de Madeiras**, 2013. Disponível em: <[http://pimads.org/documento\\_atividades/Apostila%20-%20Secagem%20de%20Madeiras..pdf](http://pimads.org/documento_atividades/Apostila%20-%20Secagem%20de%20Madeiras..pdf)>. Acesso em: 12 dez. 2016

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

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

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

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

Medidores Elétrico. **IM Insmart**. Disponível em: < [www.insmart.com.br](http://www.insmart.com.br) >. Acesso em: 10, set. 2020.