

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELISA PIZZAIA GOLTZ

APLICAÇÃO DO MÉTODO DIELÉTRICO, PRINCÍPIO CAPACITIVO PARA A
MEDIÇÃO DA UMIDADE DE CAVACOS DE MADEIRA

CURITIBA

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELISA PIZZAIA GOLTZ

APLICAÇÃO DO MÉTODO DIELÉTRICO, PRINCÍPIO CAPACITIVO PARA A
MEDIÇÃO DA UMIDADE DE CAVACOS DE MADEIRA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais, Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Coorientador: Prof. Dr. Maurício Pereira Cantão

CURITIBA

2018

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Goltz, Elisa Pizzaia

Aplicação do método dielétrico, princípio capacitivo para a medição da
umidade de cavaços de madeira / Elisa Pizzaia Goltz. – Curitiba, 2018.
87 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

Coorientadores: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Prof. Dr. Maurício Pereira Cantão

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
Defesa: Curitiba, 31/08/2018.

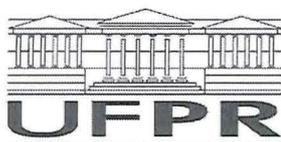
Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais

1. Madeira - Secagem. 2. Umidade. 3. Higrometria. 4. Dielétricos. 5.
Teses. I. Rocha, Márcio Pereira da. II. Klitzke, Ricardo Jorge. III. Cantão,
Maurício Pereira. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.847

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1180



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ELISA PIZZAIA GOLTZ** intitulada: **APLICAÇÃO DO MÉTODO DIELÉTRICO, PRINCÍPIO CAPACITIVO PARA A MEDIÇÃO DA UMIDADE DE CAVACOS DE MADEIRA**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 31 de Agosto de 2018.

MÁRCIO PEREIRA DA ROCHA
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

PEDRO HENRIQUE GONZALEZ DE CADEMARTORI
Avaliador Interno (UFPR)

ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO
Avaliador Externo (UNESP/BOT)



DEDICATÓRIA

Dedicado a Roberto Goltz e Leticia Pizzaia, pelos tantos passos que deram sem usufruir da caminhada, fazendo com que eu é que fosse adiante.

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido e companheiro de toda vida, Nikalay, que acompanhou, cheio de interesse e suporte, todos os avanços e retrocessos do trabalho.

À minha querida Alice, irmã e melhor amiga, pelos ensinamentos de inteligência emocional que me proporcionou nos últimos anos e por ouvir o que eu, durante o mestrado, tive para ensinar.

Aos meus pais, Letícia e Roberto, pela combinação de todas as escolhas que me favoreceram e permitiram chegar até aqui.

À família Kumov, que também é minha: Izabel, Nicola, Sebastiana, Myr, Tathi, Murilo, Heitor e Boris, por todo o carinho.

Aos orientadores Ricardo Jorge Klitzke e Márcio Pereira da Rocha pelo compartilhamento de conhecimentos e por toda ajuda fornecida nesse trabalho.

Aos professores Ivan Venson e Renato Robert por todo o empenho no ensino durante a minha graduação e pela amizade que remanesce.

A Universidade Federal do Paraná, pela minha minha formação.

Ao curso de Pós-Graduação e a coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFPR, por todo trabalho envolvido.

À Marrari Automação, em especial Celso, Paulo e Sérgio, pela minha inserção no mercado de trabalho e pela rara abertura para a troca de conhecimentos entre indústria e academia, tantas vezes tolhida no Brasil.

Aos amigos Weronika, Zatt, Felipe Artuso, Cleriston, Victor, Bruna, Emilin, Lucas Costa, Lucas Teixeira, Diessica, Bruna Bacellar, Guilo, Wagner Nazari em especial Jéssica Aline Bueno, por me acompanhar em formação e profissionalmente, mudando de assuntos de tecnologia para assuntos de amizade, tão natural e facilmente.

Aos colegas de trabalho André Simon, Pedro Boing, Matheus Bianchi, Joyce, Fernanda, Uchoa e Antônio, por todo o suporte técnico, pela colaboração durante a coleta de dados e pela leveza e alegria que trazem à rotina.

A todos que foram citados e aos que não o foram, mas contribuíram de alguma forma para esta pesquisa, eu agradeço.

RESUMO

Cavacos de madeira são usados tanto como matéria-prima para a produção de celulose e painéis de madeira quanto como biomassa para a geração de energia em caldeiras de força. Em ambas as situações, o conhecimento e identificação rápida da umidade é essencial às atividades de transporte, comércio e controle de qualidade dos cavacos. Neste contexto, medidores de umidade ágeis se fazem necessários. Uma das opções para a medição instantânea da umidade de cavacos é o método dielétrico com princípio capacitivo. O objetivo deste trabalho foi avaliá-lo e validá-lo. O trabalho divide-se em duas fases: elaboração de funções de medição em laboratório e validação das funções em campo. As funções de medição foram elaboradas para quatro tipos de cavacos. Os cavacos utilizados foram de pinus e de eucalipto, coletados em empresas que os utilizam para a fabricação de celulose ou painéis (cavacos sem casca) e para a geração de energia (cavacos com casca). Na primeira fase do trabalho, os cavacos foram levados para o Laboratório de Secagem da Madeira da Universidade Federal do Paraná e expostos à secagem em condições ambientes, durante a qual eram coletadas as informações das leituras do sensor e subamostras para a determinação da umidade pelo tradicional método gravimétrico. Após três meses de secagem, a leitura do sensor foi relacionada à umidade para a elaboração das quatro funções de medição: uma para cada tipo de cavaco. Na segunda fase do trabalho, as funções elaboradas foram inseridas no medidor com sensor capacitivo, o qual foi levado a campo para a validação das funções, através da comparação entre a leitura de umidade obtida com o equipamento e o resultado da umidade obtido posteriormente em laboratório. As funções de medição mostraram alta correlação entre umidade e a leitura do sensor, com coeficientes de correlação acima de 90%. A segunda fase do trabalho forneceu evidências de exatidão do princípio capacitivo através de resultados de umidade semelhantes entre leitura do medidor e resultados de laboratório. Entretanto, a acurácia das medidas para cavacos de pinus foi maior que para cavacos de eucalipto, fator este justificado pela maior variação de densidade da madeira do gênero eucalipto. O método dielétrico e princípio capacitivo pode ser usado para a medição instantânea da umidade de cavacos tanto para a fabricação de produtos quanto para biomassa para geração de energia e a metodologia utilizada no presente trabalho pode ser registrada como um procedimento de ajuste e medição usando o método.

Palavras-chave: Medição da umidade. Umidade da biomassa. Cavacos de madeira. Sensor capacitivo.

ABSTRACT

Woodchips are used both as raw material for cellulose and panels production and as biomass for energy generation in industrial boilers. In both situations, the moisture information and the identification of the moisture in a fast way is essential for the activities of woodchips transportation, commercialization and quality control. In this context, agile moisture meters are necessary. One of the options for the woodchips instantaneous measurement is the dielectric method with capacitive principle. The objective of this work was to evaluate and validate it. The work is divided into two phases: measurement functions elaboration in laboratory and measurement functions validation in field. The measurement functions were elaborated for four woodchips types. The used woodchips were from pinus and eucalyptus, collected in industries that use them for cellulose and panels fabrication (woodchips without bark) and for energy generation (with bark). In the first phase, the woodchips were taken to the Wood Drying Laboratory in Federal University of Paraná (UFPR) were exposed to drying in natural conditions, during which informations of the sensor readings and subsamples for moisture determination through the traditional gravimetric method were collected. After three months of drying, the sensor reading were related to moisture to elaborate four measurement functions: one for each type of woodchips. In the second work phase, the elaborated functions were inserted in the equipment with capacitive sensor, which was taken to field to the functions validation, through the comparison between the moisture reading obtained with the equipment and the moisture result obtained subsequently in laboratory. The measurement functions showed high correlation between moisture and the reading of the sensor, with determination coefficients above 90%. The second phase of the work provided evidences of accuracy in the capacitive principle through moisture results similar for the meter and laboratory results. However, the Measurement's accuracy for pinus woodchips were higher than for eucalyptus woodchips, fact that was justified for the higher density variation of the eucalyptus gender. The dielectric method and the capacitive principle can be used for instantaneous woodchips moisture measurement, both for the products fabrication and for energy generation and the methodology used in the present work can be registred as an adjust and measurement procedure using the method.

Key words: Moisture measurement. Biomass moisture. Woodchips. Capacitive sensor.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – COMPOSIÇÃO DA ÁREA DE ÁRVORES PLANTADAS NO BRASIL POR TIPO DE PROPRIETÁRIOS EM 2016	16
FIGURA 2 - MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA EM 2015.....	20
FIGURA 3 - MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA EM 2016.....	20
FIGURA 4 - RELAÇÃO ENTRE UMIDADE EM BASE ÚMIDA E EM BASE SECA	26
FIGURA 5 – LISTA DE MÉTODOS PARA A MEDIÇÃO DE UMIDADE, POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO E SUCESSO REPORTADO	32
FIGURA 6 – POLARIZAÇÃO DE UM DIELÉTRICO	34
FIGURA 7 - HIERARQUIA DE CALIBRAÇÃO PARA UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE UMIDADE ATRAVÉS DO MÉTODO DIELÉTRICO COM PRINCÍPIO CAPACITIVO	36
FIGURA 8 - DIFERENÇA ENTRE EXATIDÃO E PRECISÃO	37
FIGURA 9 - ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA COM MÉTODO HIPOTÉTICO- DEDUTIVO	39
FIGURA 10 - ADAPTAÇÃO DO ESQUEMA DE PESQUISA HIPOTÉTICO- DEDUTIVA PARA O PRESENTE TRABALHO.....	41
FIGURA 11 – MEDIDOR DE UMIDADE DE CAVACOS DO MODELO MUG M75 (MARRARI, BRASIL).....	42
FIGURA 12 - PONTOS PARA A CONFIGURAÇÃO DE UMA FUNÇÃO DE MEDIÇÃO DE MODELO EXPONENCIAL NO MEDIDOR DE UMIDADE	43
FIGURA 13 - INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO PARA A SECAGEM DOS CAVACOS	46
FIGURA 14 – ENCHIMENTO PADRÃO DO RECIPIENTE ONDE A AMOSTRA É EXPOSTA AO SENSOR PARA A COLETA LEITURA DO SENSOR EM <i>BITS</i>	47
FIGURA 15 - DIFERENTES PONTOS NO PÁTIO DE CAVACOS ONDE FORAM COLETADAS AS LEITURAS DE UMIDADE COM O MEDIDOR DIELÉTRICO	49

FIGURA 16 - SEQUÊNCIA DE MEDIÇÕES: PRIMEIRAMENTE FORAM COLETADAS LEITURAS DE UMIDADE COM O SENSOR CAPACITIVO E A SEGUIR SUBAMOSTRAS FORAM LEVADAS AO LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO	50
FIGURA 17 - ORGANIZAÇÃO DA ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DO MÉTODO DIELÉTRICO: NÚMERO DE FATORES, TRATAMENTOS, NÍVEIS E REPETIÇÕES.....	50
FIGURA 18 - CURVAS DE SECAGEM PARA CAVACOS DE PINUS COM E SEM CASCA.....	53
FIGURA 19 - CURVAS DE SECAGEM PARA CAVACOS DE EUCALIPTO COM E SEM CASCA	54
FIGURA 20 - FUNÇÕES DE MEDIÇÃO PARA CAVACOS DE PINUS COM E SEM CASCA.....	57
FIGURA 21 - FUNÇÕES DE MEDIÇÃO PARA CAVACOS DE EUCALIPTO COM E SEM CASCA	57
FIGURA 22 – PONTOS AM1, AM2, AM3, AM4 E AM5 ESCOLHIDOS SOBRE A CURVA DE CORRELAÇÃO ENTRE <i>BITS</i> E UMIDADE PARA PARAMETRIZAR O MEDIDOR DE UMIDADE PARA CADA TIPO DE CAVACO	59
FIGURA 23 - VALORES DE DESVIO-PADRÃO DOS RESÍDUOS PARA A MEDIÇÃO DE UMIDADE COM MEDIDOR CAPACITIVO NO TRABALHO EM DOIS TRABALHOS PUBLICADOS.....	61
FIGURA 24 - TESTE DE NORMALIDADE PARA RESÍDUOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA CADA TIPO DE CAVACO	62
FIGURA 25 - INTERVALOS DE COMPARAÇÃO DE VARIÂNCIAS COM NÍVEL DE CONFIANÇA 95%.....	66
FIGURA 26 - TESTE DE NORMALIDADE PARA OS ERROS ENTRE OS MÉTODOS GRAVIMÉTRICO E DIELÉTRICO PARA QUATRO TIPOS DE CAVACOS.....	67
FIGURA 27 - GRÁFICOS DE INTERVALOS DE MEDIÇÕES COM OS MÉTODOS GRAVIMÉTRICO E DIELÉTRICO PARA QUATRO TIPOS DE CAVACOS.....	68

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA A REMUNERAÇÃO DA BIOMASSA FLORESTAL.....	22
TABELA 2 - LEITURA EM <i>BITS</i> E UMIDADE EM BASE ÚMIDA DURANTE A SECAGEM DE CADA TIPO DE CAVACO	52
TABELA 3 – FUNÇÕES DE MEDIÇÃO PARA CADA TIPO DE CAVACO E SEUS VALORES TÍPICOS	58
TABELA 4 - ERROS PREVISTOS DO MEDIDOR COM SENSOR CAPACITIVO PARA CADA TIPO DE CAVACO	62
TABELA 5 - RELAÇÃO ENTRE A FAIXA DE MEDIÇÃO DE UMIDADE, A FAIXA DE VARIAÇÃO DOS RESÍDUOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO E O DESVIO PADRÃO DOS RESÍDUOS OU ERRO ESPERADO DO MEDIDOR.....	63
TABELA 6 - RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DAS REPETIÇÕES (REP) E DA MÉDIA DE CINCO AMOSTRAS (AM) ATRAVÉS DOS MÉTODOS GRAVIMÉTRICO (GRAV) E DIELÉTRICO (DIELETRIC) PARA QUATRO TIPOS DE CAVACOS	64
TABELA 7 - RESULTADOS DE VALOR-P PARA TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIAS COM NÍVEL DE CONFIANÇA 95%.....	65
TABELA 8 - VALORES TÍPICOS DA APLICAÇÃO DA ANOVA COMPARANDO MÉDIAS (x) DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO E DO MÉTODO DIELÉTRICO PARA QUATRO TIPOS DE CAVACOS.....	69
TABELA 9 - MÉDIAS E DESVIOS PADRÕES DE UMIDADE MEDIDO COM OS MÉTODOS GRAVIMÉTRICO E DIELÉTRICO PARA QUATRO TIPOS DE CAVACOS	70

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	11
SUMÁRIO	12
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	15
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1 O USO DE CAVACOS DE MADEIRA	16
3.1.1 Cavacos como Matéria-Prima para Produção de Celulose	17
3.1.2 Cavacos como Matéria-Prima para Produção de Painéis de Madeira	18
3.1.3 Cavacos como Biomassa para Geração de Energia	19
3.2 ÁGUA NA MADEIRA	22
3.3 MÉTODOS PARA A MEDIÇÃO DA UMIDADE	24
3.3.1 Métodos primários	24
(a) Método gravimétrico	24
(b) Método de congelamento	27
3.3.2 Métodos secundários	27
(c) Espectroscopia de infravermelho próximo (<i>NIR</i>)	27
(d) Dielétrico.....	28
(e) Duplo Raio-X.....	29
(f) Ressonância nuclear magnética.....	30
3.3.3 Estado da arte – Resultados de outros autores.....	30
3.3.4 Comparação entre métodos	31
3.4 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DA MADEIRA	33
3.5 METROLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO.....	35
3.6 MÉTODO DE PESQUISA.....	38
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	40
4.1 ROTEIRO DE ATIVIDADES	40
4.2 OBTENÇÃO DA UMIDADE PELO MÉTODO DIELÉTRICO COM MEDIDOR CAPACITIVO	42

4.3	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO	44
4.4	COLETA DO MATERIAL	45
4.5	ETAPA 1: ELABORAÇÃO DE FUNÇÕES DE MEDIÇÃO	46
4.5.1	Instalação do Experimento	46
4.5.2	Coleta de Dados	47
4.5.3	Análise Estatística de Regressão	48
4.6	ETAPA 2: VALIDAÇÃO DO MÉTODO DIELÉTRICO	48
4.6.1	Coleta de Dados	49
4.6.2	Análise Estatística de Variância	50
5	RESULTADOS E E DISCUSSÃO	52
5.1	ELABORAÇÃO DE FUNÇÕES DE MEDIÇÃO	52
5.1.1	Curvas de Secagem dos Cavacos	53
5.1.2	Análise Estatística de Regressão	56
5.2	VALIDAÇÃO DO MÉTODO	63
5.2.1	Exatidão do Método Dielétrico	67
5.2.2	Precisão do Método Dielétrico	69
5.2.3	Respostas à Pesquisa Hipotética Dedutiva	71
6	CONCLUSÕES	73
7	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Há alguns anos, com exceção da produção específica para as indústrias de celulose e de painéis de madeira, cavacos de madeira eram considerados não mais que passivos ambientais. O armazenamento de cavacos gerava preocupações e pagava-se para destiná-los à queima ou compostagem. Ou seja, cavacos tinham valor de mercado negativo. Entretanto, para Wiecheteck (2009), é fato que os resíduos de madeira não são mais vistos somente como sinônimo de passivo ambiental, tendo ocorrido iniciativas de fomento de alternativas de uso adequado dos mesmos, entre eles para fins energéticos. Hoje, enquanto passivos ambientais para algumas indústrias, cavacos são matéria-prima para outras.

Segundo Ibá (2017), na indústria, em 2016, 25,5% dos resíduos do setor florestal foram reutilizados como matéria-prima por outras empresas do setor e 66% dos resíduos foram destinados à geração de energia por meio da queima em caldeiras que geram vapor e, eventualmente, energia elétrica para o processo produtivo, eliminando a utilização de combustível fóssil. Além disso, o uso de cavacos para a geração de energia não é feito apenas pelas indústrias do setor florestal. Os setores têxtil e alimentício adotam cada vez mais caldeiras de força alimentadas com cavacos para a geração de energia.

Com a valorização deste produto, é importante que as propriedades que determinam a qualidade dos cavacos sejam controladas. Uma dessas propriedades mais importantes para o controle de qualidade, tanto nas indústrias de celulose e painéis quanto nas indústrias que usam cavacos como biomassa para energia é a umidade.

Atualmente, no Brasil, o único método normatizado para a determinação da umidade de cavacos é o método gravimétrico, através da NBR 14929 (ABNT, 2017). Entretanto, a determinação da umidade utilizando o método gravimétrico é aplicada a pequenas amostras de 200g de cavacos e torna-se morosa, já que pode exigir até 24h para fornecer um resultado.

As indústrias que utilizam cavacos exigem, cada vez mais, respostas rápidas e antecipadas ao processo. É necessário saber qual é a umidade dos cavacos que alimentam uma caldeira de força para prever seu rendimento; é necessário saber qual é a umidade dos cavacos que serão cozidos no digestor de indústrias de celulose para fazer a dosagem dos reagentes e é preciso saber qual é a umidade das cargas de cavacos comercializadas e remuneradas por tonelada. Portanto, para o controle da umidade no armazenamento, no transporte, no comércio e na queima de cavacos, é necessário o uso de métodos mais ágeis e passíveis de aplicação em grandes amostras.

O tema do presente trabalho se restringe a analisar o método dielétrico e o princípio capacitivo para a determinação da umidade de cavacos de madeira de maneira rápida e abrangente.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi validar o método dielétrico e o princípio capacitivo para a determinação da umidade de cavacos de madeira e foi atingido através dos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento das funções de medição de um sensor capacitivo para cavacos de madeira de eucaliptos e pinus.;
- Validar o método verificando o desempenho das funções de medição elaboradas através da análise da precisão e da exatidão do método dielétrico;
- Registrar procedimento de medição para a aplicação de sistemas de medição que usam o princípio capacitivo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O USO DE CAVACOS DE MADEIRA

Sabe-se que os cavacos usados no Brasil são provenientes de florestas plantadas e que a maioria das plantações de árvores no país são de pinus e eucalipto (Ibá, 2017). A Figura 1 mostra que de toda a área plantada no Brasil, 34% das árvores são destinadas à indústria de papel e celulose. Ou seja, ao menos 34% das árvores plantadas no Brasil são transformadas em cavacos. Além disso, dentro dos outros segmentos se encontram também indústrias consumidoras de cavacos para a produção de painéis de madeira e para a geração de energia.

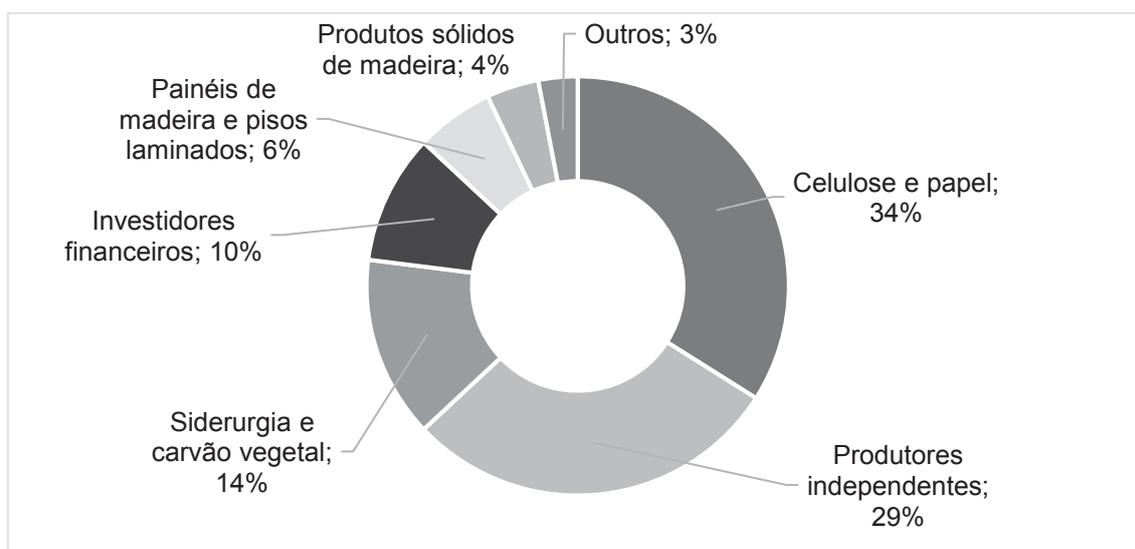


FIGURA 1 – COMPOSIÇÃO DA ÁREA DE ÁRVORES PLANTADAS NO BRASIL POR TIPO DE PROPRIETÁRIOS EM 2016

FONTE: Ibá, 2017

Neste contexto, considerando os principais usos dos cavacos no Brasil, o presente subcapítulo divide-se em Cavacos como Matéria-Prima para Produção de Celulose, Cavacos como Matéria-Prima para Produção de Painéis de Madeira e Cavacos como Biomassa para Geração de Energia.

3.1.1 Cavacos como Matéria-Prima para Produção de Celulose

Segundo Ibá (2017), a indústria de celulose no Brasil vem se fortalecendo nos últimos anos, e conseqüentemente, utilizando cada vez mais cavacos. O anuário informa que em 2016 a produção de celulose foi 8,1% superior à produção de 2015. Conseqüentemente, a utilização de cavacos foi também muito maior.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade da Klabin, 2015 e da Veracel, 2016, a primeira etapa da fabricação de celulose e papel é o recebimento de toras de madeira que são picadas e transformadas em cavacos. A casca é destinada à caldeira de força para a geração de energia e os cavacos de madeira são destinados ao digestor para a etapa de cozimento. A madeira dos plantios pertencentes ao grupo que não é usada, é vendida para pequenos empresários, entre eles, produtores de biomassa. Segundo os anuários ainda, as árvores plantadas de pinus são utilizadas para a fabricação de celulose de fibra longa e as árvores de eucalipto são utilizadas para a fabricação de celulose de fibra curta. São várias as espécies e clones utilizados neste processo e a escolha e proporção é dependente de estudos de genética.

O rápido crescimento das árvores plantadas por grupos produtores de celulose provoca a produção de madeira jovem e leve. É possível observar, portanto, que a maioria dos cavacos produzidos e utilizados no país tem como característica geral baixa massa específica. Segundo Muñiz (1993), existe uma relação direta entre a quantidade de lenho tardio em uma árvore e a massa específica da madeira: o lenho tardio contém maior quantidade de material lenhoso por unidade de volume do que o lenho inicial.

Quanto ao tamanho, para Grace *et. al.* (1989), um cavaco típico de madeira destinado à produção de celulose deve medir de 15 a 20 milímetros de comprimento na direção de grã, 12 a 25 milímetros de largura, e apenas de 3 a 6 milímetros na secção mais curta, transversal à grã da madeira.

Na indústria de celulose o controle da umidade é importante porque os custos de transporte e comercialização de cavacos são influenciados pela

quantidade de água neles contida (Biermann, 1996). Além disso, o autor lembra que o uso de reagentes para a obtenção da polpa celulósica é calculado sobre a massa de cavacos, que também é dependente da umidade. Para Biermann, a umidade nos processos de obtenção de polpa celulósica deve ser próxima de 50% em base úmida. Dueñas (1997) explica que umidades maiores que 60% em base úmida podem causar a diluição dos produtos químicos reagentes na produção da celulose e Kocurek (1992), esclarece que umidades abaixo de 30% acarretam dificuldades de impregnação dos produtos químicos e consequente dificuldade na deslignificação, provocando maior quantidade de rejeitos na obtenção de polpa celulósica.

3.1.2 Cavacos como Matéria-Prima para Produção de Painéis de Madeira

Segundo Mattos *et al.* (2008), há dois tipos de painéis: os que são feitos de madeira reconstituída e os confeccionados com base na madeira processada mecanicamente. Cavacos de madeira são utilizados para a fabricação de painéis de madeira reconstituída, ou seja: aglomerado/MDP (*medium density particleboard*), MDF (*medium density fiberboard*), OSB (*oriented strand board*) e chapa dura HDF (*high density fiberboard*). Os autores relatam ainda que, no Brasil, os subprodutos de serraria são transformados em cavacos para a produção de painel aglomerado ou MDP e para a produção de MDF. Já os painéis OSB, segundo Lelles *et al.* (1998), são diferentes dos aglomerados tradicionais porque impossibilitam a utilização de subprodutos de serraria na sua fabricação, em função das dimensões das partículas. Portanto, a produção de OSB e de chapas duras demanda de cavacos provenientes de florestas plantadas.

Belini *et al.* (2008) relatam que não há uma especificação padrão para determinar as dimensões de cavacos para a produção de painéis. Os autores afirmam que há variações nas unidades industriais produtoras de painéis e citam o exemplo da Metso Paper (2007), por exemplo, que recomenda o ajuste do picador para as dimensões de 4,1 x 24,2 x 43,4 mm (espessura, largura, comprimento).

Maloney (1989) afirma que no processo de produção de painéis a alta umidade dos cavacos aumenta o custo na secagem, produz fibras crespas que dificultam a colagem, demandando mais resina. Labosky *et. al.* (1993) consideram a umidade dos cavacos durante o desfibramento como o segundo fator que mais afeta as propriedades dos painéis de madeira. Os autores concluíram que fibras provenientes de cavacos com baixo teor de umidade apresentaram-se inteiras e em feixes, dificultando a formação do colchão. Observações como estas permitiram a Weber (2011) afirmar que, no setor de painéis, a matéria-prima deve ser, sempre que possível, segregada por tipo, teor de umidade e espécie.

3.1.3 Cavacos como Biomassa para Geração de Energia

Para McKendry (2011), biomassa é o termo para designar todo material orgânico proveniente de caules de plantas no qual a energia solar é armazenada em ligações químicas através de fotossíntese. Quando as ligações são quebradas, estas substâncias liberam a energia química que estava armazenada. Júnior (2013), divide os tipos de biomassa vegetal em amiláceas (arroz, milho e sorgo), lignocelulósicas (madeira – material de estudo do presente trabalho - e subprodutos agrícolas de cereais, bagaço de cana-de-açúcar e sorgo), oleaginosas (soja, algodão, mamona, palma de óleo de dendê, girassol e amendoim) e sacarídeas (cana-de-açúcar).

Segundo Moreira (2011), o uso da madeira como biomassa para energia tem como vantagem a possibilidade de sua exploração ou plantio na maioria dos países, a qual, diferente dos combustíveis fósseis, pode ser produzida e disponibilizada nacionalmente, reduzindo a dependência externa. Soares *et. al.* (2003) relataram previsão que hoje se concretiza: parte das plantações de *Eucalyptus sp.* hoje é utilizada segundo o conceito de florestas para multiprodutos. Dentre os muitos produtos, um dos usos é a geração de energia, sendo esta a opção com maior possibilidade de remuneração. O crescente interesse por cavacos de madeira e outros tipos de biomassa pode ser verificado nos últimos relatórios do Balanço Energético Nacional. Em 2014, 7,4% do

consumo de energia no Brasil foi proveniente de biomassa (BEN, 2015). As Figuras 2 e 3 mostram que a participação da biomassa na matriz energética nos últimos anos, com 17,4% (bagaço de cana e lenha) em 2015 e 18,0% em 2016.

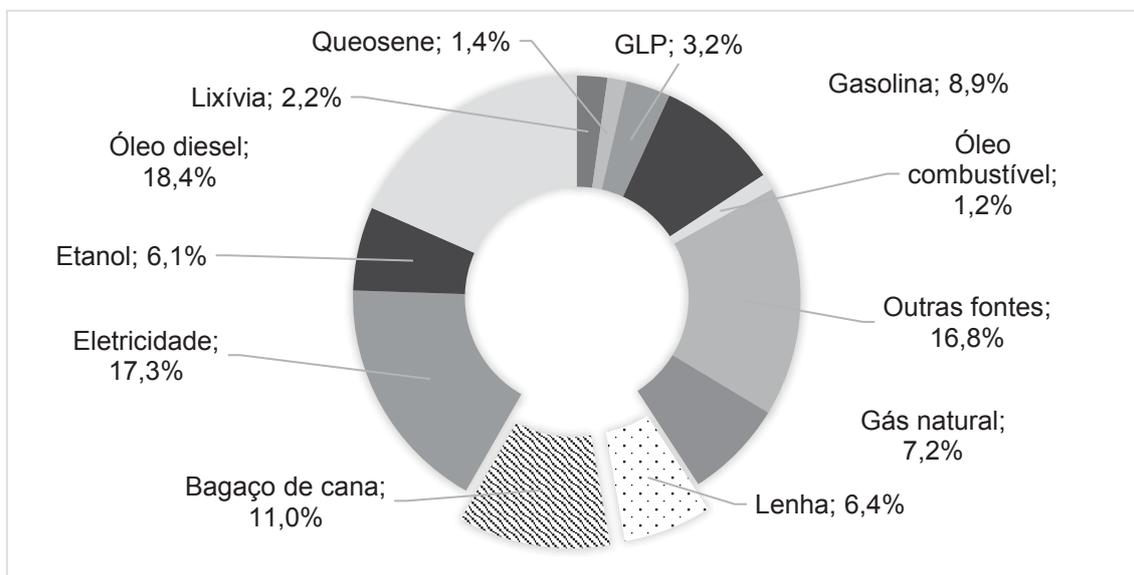


FIGURA 2 - MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA EM 2015

FONTE: BEN, 2017

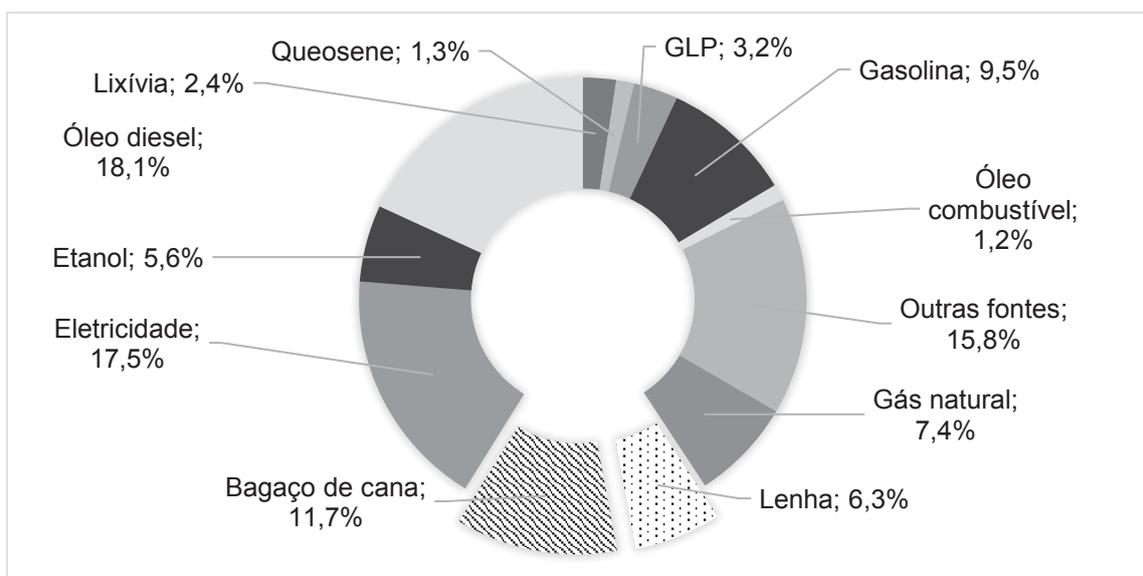


FIGURA 3 - MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA EM 2016

FONTE: BEN, 2017

É interessante ressaltar que o uso de fontes renováveis como cavacos para a geração de energia é especialmente aplicado em indústrias do setor florestal. Ibá (2017) relata que diferentemente de outros setores econômicos do Brasil, a indústria de árvores plantadas é responsável por gerar a maior parte da energia consumida nos seus próprios processos produtivos.

Vidal *et. al.* (2011) listam duas fontes existentes atualmente para a oferta de biomassa de madeira: subprodutos (florestais, industriais ou urbanos) e plantações de florestas energéticas. Os autores relatam que a maior parte da biomassa proveniente de subprodutos consiste de galhos deixados durante o processo de corte e colheita.

No contexto das florestas plantadas, Goldenberg (1998) descreveu as florestas energéticas como florestas plantadas para corte e utilização, sendo continuamente restauradas. Furtado *et al.* (2012), relatam que o crescimento do uso da biomassa florestal para a geração de energia provocou o surgimento de um setor florestal específico dentro de empresas que até então não participavam da área de produtos florestais. Grandes grupos brasileiros e multinacionais mostraram preocupação em adequar manejo de plantios próprios para a inclusão da geração de energia a partir de florestas. Empresas como JBS, BRF, Frísia e multinacionais aqui instaladas como Danone, Nestlé, Ajinomoto e Cargill hoje são proprietárias de grandes unidades florestais. (Relatório Anual de Sustentabilidade da JBS e BRF, 2016).

Juizo *et. al.* (2016) relatam que as principais espécies de eucalipto utilizadas para a produção de energia, são *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus saligna*, *Corymbia citriodora* e seus clones híbridos. STPC (2015) informa que há também outros grupos de espécies além de pinus e eucaliptos oriundas de florestas plantadas e que são de rápido crescimento usadas para fins energéticos, porém com uma importância local, a exemplo da Acácia-Negra (*Acacia mearnsii*), no Rio Grande do Sul, *Acacia mangium* na Região Norte do país, Seringueira (*Hevea brasiliensis*) no Centro-Oeste e outras.

Brand *et. al.* (2017) afirmam que indubitavelmente o fator predominante para a qualidade da biomassa florestal é o teor de umidade, não apenas pelo

seu impacto no poder calorífico, mas também pelo seu impacto nos custos de transporte e armazenagem. Para Moreira *et. al.* (2010), o ideal seria que todos os fatores que influenciam na quantidade de energia contida por volume de madeira (densidade, umidade e PCU) fossem levados em conta para fins de remuneração – dentre eles, a umidade. A Tabela 1 mostra dois métodos para a remuneração da biomassa por energia: o método 1 não leva em conta os fatores influenciadores na quantidade de energia e o método 2 leva em conta cada um deles, considerando variações na umidade e densidade, que por sua vez influenciam os valores de PCU. É possível verificar que, pelo Método 2, quanto maior a umidade da biomassa, menor o poder calorífico e maior o custo energético.

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA A REMUNERAÇÃO DA BIOMASSA FLORESTAL

Método	Densidade (kg/m ³)	Umidade em base úmida (%)	PCU (Mcal/kg)	Custo energético (R\$/Gcal)
1	-	-	-	R\$ 51,47
2	500	10	3,60	R\$ 38,89
2	500	30	2,72	R\$ 51,47
2	500	50	1,77	R\$ 79,10
1	-	-	-	R\$ 51,47
2	600	10	3,60	R\$ 32,41
2	600	30	2,72	R\$ 42,89
2	600	50	1,77	R\$ 65,91

FONTE: Moreira *et. al.* (2010)

3.2 ÁGUA NA MADEIRA

Kollmann *et. al.* (1068) relatam que há dois tipos de água na madeira: a água de capilaridade ou água livre e a água de adesão, higroscópica ou água presa. A água de capilaridade (água livre) é localizada nos vasos, meatos, canais e lúme das células, podendo ser facilmente retirada. Quando toda a água capilar é retirada da madeira, remanesce apenas a água de adesão. A água de adesão (higroscópica ou presa) é ligada às fibras da madeira, encontra-se nas camadas

polimoleculares e nos espaços submicroscópicos da parede ligadas por forças elétricas conhecidas como ligações de hidrogênio. Sua retirada é difícil e lenta, exigindo a utilização de maior quantidade de energia (Skaar, 1972). Segundo os autores, quando toda a água de capilaridade é retirada da madeira e remanesce apenas a água de adesão, diz-se que a madeira atinge seu ponto de saturação das fibras (PSF).

De acordo com Skaar (1972) os seguintes fatores influem na umidade de equilíbrio da madeira: umidade relativa, temperatura, espécie da madeira e extrativos, a história da exposição, tensões mecânicas e radiação. A umidade relativa e a temperatura são, entretanto, os fatores que predominam. Na cidade de Curitiba, onde a presente pesquisa foi desenvolvida durante o mês de agosto, a umidade média de equilíbrio para madeira de diversas espécies relatada por Galvão (1975) foi igual a 15,7 % em base seca.

Segundo Jankowsky (2000), a estrutura anatômica da madeira condiciona sua permeabilidade. Andrade (2000) relatou que maior massa específica significa maior espessura da parede celular e menor volume do lume. Dessa forma, madeiras mais densas possuem maior quantidade de água higroscópica, cuja movimentação é mais lenta. Espera-se, portanto, que a secagem de cavacos de madeira de pinus aconteça mais facilmente que a secagem de cavacos de eucalipto. Siau (1971) esclarece que, nas folhosas, os caminhos percorridos pela água são os vasos e podem apresentar resistência à passagem de fluidos devido à ocorrência de tiloses, que são expansões de células adjacentes para o interior do elemento vascular que atravessam os pares de pontoações, interrompendo de forma parcial ou total a permeabilidade dos vasos. Já nas coníferas, formadas por traqueídeos axiais dispostos longitudinalmente, a água penetra no lume por extremidades afiladas e se movimenta passando por traqueídeos adjacentes através de pontoações areoladas.

3.3 MÉTODOS PARA A MEDIÇÃO DA UMIDADE

Jensen *et. al.* (2006) relatam que o método gravimétrico (primário) é largamente aceito para a determinação de umidade da biomassa e para a base do cálculo de seu preço. Entretanto, o método exige tempo e trabalho. A potencial economia de tempo fornece motivação para o uso de métodos rápidos (secundários). Este item trata de alternativas à medição da umidade de cavacos usando o método gravimétrico dividindo-os em métodos primários - que se baseiam em princípios fundamentais e padrões de medição – e métodos secundários – aplicados através de instrumentação cujas funções de medição são elaboradas a partir de resultados obtidos com os métodos primários para a medição da umidade de cavacos.

3.3.1 Métodos primários

(a) Método gravimétrico

O teor de umidade é didaticamente expressado a partir da aplicação do método gravimétrico, que pode ser resumido em três passos: pesagem da amostra no estado de umidade que se quer determinar, secagem completa da amostra e pesagem final. Considera-se que o conteúdo eliminado durante a secagem é o conteúdo de água existente na madeira no início da análise.

Glass *et. al.* (2010), expressa o teor de umidade em base seca, como o quociente entre a massa de água e a massa de madeira contida em determinada amostra, que pode ser calculado através da Equação (1)

$$U_{bs} = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \cdot 100(1)$$

sendo:

- U_{bs} o teor de umidade em % base seca;
- m_u a massa úmida (massa total da amostra) em g e
- m_s a massa seca (massa de madeira) em g.

Além disso, no mercado de biomassa para energia é usual a expressão da umidade em base úmida, calculada pela Equação (2).

$$U_{bu} = \left(\frac{m_u - m_s}{m_u} \right) \cdot 100(2)$$

sendo:

- U_{bu} o teor de umidade em % base úmida;
- m_u a massa úmida (massa total da amostra) em g e
- m_s a massa seca (massa de madeira) em g.

É comum também encontrar o termo “secura”, como usa Dias *et. al.* (1985) para definir a umidade de cavacos nas indústrias de celulose, cujo cálculo é dado pela Equação (3).

$$S = 100 - U_{bu}(3)$$

sendo:

- U_{bu} o teor de umidade em % base úmida e
- S a secura em %.

Silva *et. al.* (2001) trazem as Equações (4) e (5) para a conversão de umidade em base seca para umidade em base úmida e vice-versa.

$$U_{bs} = \left(\frac{U_{bu}}{100 - U_{bu}} \right) \cdot 100(4)$$

$$U_{bu} = \left(\frac{U_{bs}}{100 + U_{bs}} \right) \cdot 100(5)$$

onde:

- U_{bs} é o teor de umidade em % base seca e
- U_{bu} é o teor de umidade em % base úmida.

A Figura 4 mostra gráfico que relaciona valores de umidade em base úmida a valores de umidade em base seca.

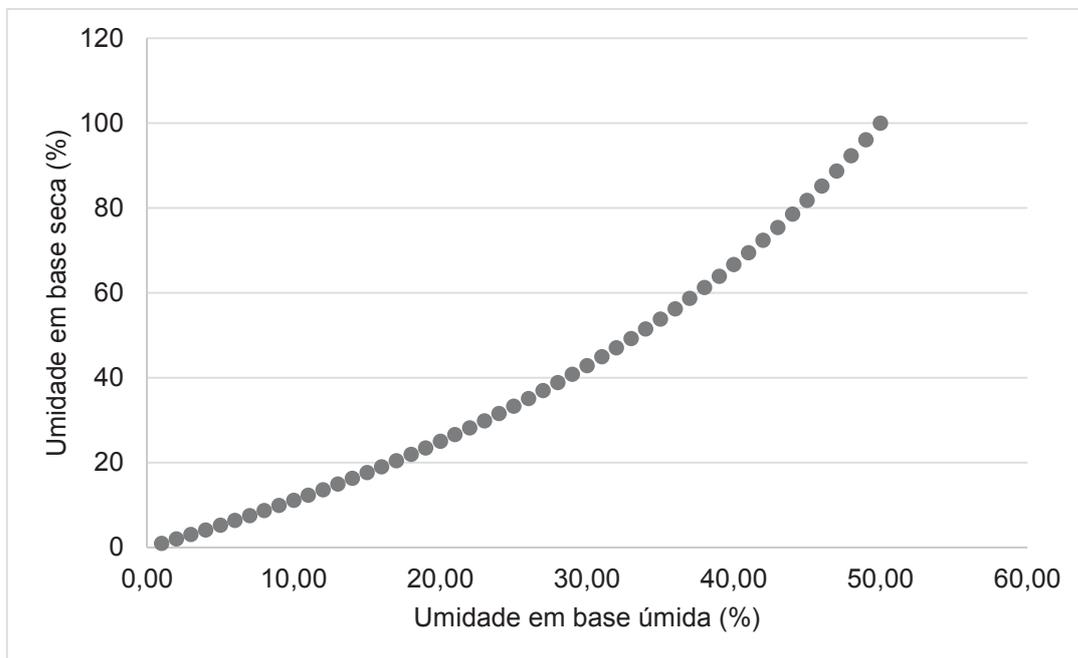


FIGURA 4 - RELAÇÃO ENTRE UMIDADE EM BASE ÚMIDA E EM BASE SECA

FONTE: O Autor

Moreschi (2012) ressalva que para madeiras que contêm altos teores de material volátil (extrativos), este método não é adequado, pois várias substâncias computadas na primeira pesagem, que não a água, poderão se volatilizar, fornecendo um teor de umidade calculado irreal.

O método gravimétrico pode ser aplicado com estufa de circulação forçada de ar, como exige a NBR 14929 (ABNT, 2017), com forno de micro-ondas, como propõe Govett *et. al.* (2010), seguindo a norma ASTM E1358 (ASTM, 1997) ou, finalmente, realizando a secagem com ondas na faixa do infravermelho (Hartmann *et. al.* 2001).

(b) Método de congelamento

Hartmann *et. al.* (2001) explicam que o método de congelamento para a determinação da umidade extrai a maior parte da água da madeira por sublimação. A amostra é inicialmente congelada a -20°C , antes de ser deixada em uma câmara de vácuo (0,12 bar), onde a pressão de vapor d'água é drasticamente reduzida por uma bomba de evacuação. Segundo os autores, a amostra é seca à temperatura ambiente, aproximadamente. Este processo exige vários dias para ser finalizado.

3.3.2 Métodos secundários

(c) Espectroscopia de infravermelho próximo (NIR)

Nyström *et. al.* (2004) também descrevem o método de espectroscopia de infravermelho próximo – *Near Infrared Spectroscopy (NIR)*. Os autores explicam que quando um material é iluminado por luz na faixa do infravermelho, parte da luz é absorvida e parte é refletida. Para todos os materiais um espectro de infravermelho pode ser alcançado medindo o reflexo da superfície atingida pela luz. O infravermelho próximo penetra em uma amostra com maior

profundidade que o infravermelho (alguns centímetros) e é por isso utilizado para a determinação da umidade de cavacos de madeira. Uma lâmpada com ondas no comprimento de 800 a 2500 nm ilumina o material; lentes coletam os comprimentos de onda refletidos e transmitem-nas para um detector. A função de medição do espectro para umidade é construída por regressão multivariada, pois variações na densidade, diferentes materiais e a distância entre a amostra e a fonte podem distorcê-lo.

(d) Dielétrico

James (1975) relatou em seu trabalho que havia muitos estudos sobre as propriedades dielétricas da madeira. Entretanto, não haviam sido publicados até então trabalhos envolvendo as propriedades dielétricas de cavacos.

Jensen *et. al.* (2006) explicam que o método dielétrico é baseado em mudanças em um campo elétrico. As mudanças acontecem devido às propriedades dielétricas da matriz do material sob radiação com corrente alternada. As propriedades dielétricas de quaisquer materiais são expressas como a permissividade relativa: a diferença entre a constante dielétrica do material e o fator de perda de energia elétrica quando o material é exposto a um campo e se polariza. A água tem alta constante dielétrica, cujo valor é aproximadamente 80, quando comparada à madeira, com constante dielétrica de 4 a 5. A partir deste simples esclarecimento, um medidor de umidade baseado no método dielétrico consiste em dois polos com diferença de potencial provocada por corrente alternada. O volume entre os polos contém um material dielétrico, como por exemplo, cavacos de madeira. Quando uma corrente alternada passa de um polo (emissor) ao outro (receptor), o decréscimo no campo elétrico efetivo comparado à mesma situação com ar ou vácuo é proporcional à umidade da amostra. Além da umidade, temperatura e densidade são influenciadores das medições dielétricas. Suas influências são mitigadas com elaboração de funções de medição –normalmente usando regressão simples - para diferentes faixas de densidade e com definição da temperatura em que os medidores dielétricos irão operar. Quanto melhor classificadas e

isoladas estas variáveis, maior a precisão dos medidores dielétricos. Além disso, uma vez que o método relaciona propriedades dielétricas à quantidade de água existente no dielétrico e não à quantidade de dielétrico (madeira), o resultado de umidade é sempre obtido em base úmida.

Segundo Nyfors (2000), é interessante lembrar também que o método dielétrico tem inúmeras vantagens em comparação a outros, pois além de permitir a determinação rápida e não destrutiva de propriedades de materiais como a umidade, as medidas não são perigosas, pois usam baixos níveis de energia e tem grande profundidade de penetração, o que fornece possibilidade da utilização de sensores superficiais.

É possível aplicar o método dielétrico em duas situações. Jensen *et. al.* (2006) esclarecem que se o comprimento de onda aplicado no método dielétrico está na faixa de rádio frequência (maior que 0,3 GHz), o medidor de umidade é do tipo capacitivo. Uma alternativa às ondas de rádio são as microondas (0,3 a 20 GHz). Segundo os autores, similares aos medidores capacitivos, a técnica de microondas mede a umidade enviando uma onda com frequência definida ao material. As ondas são absorvidas ou refletidas pelas moléculas dipolo de água e a medição é realizada com um fator de transmissão e um fator de reflexão. Esta técnica é particularmente atrativa desde que influências de condutividade iônica sejam desprezíveis em altas frequências se comparadas à perda dielétrica.

(e) Duplo Raio-X

Nyström *et. al.* (2004) resumem o método de raios X da seguinte forma: a radiação X é absorvida pelo material e comparada à massa total do feixe emitido. Segundo o autor, a absorção fotoelétrica é bastante afetada por materiais leves como carbono e oxigênio. Escolhendo níveis de energia a serem absorvidos por materiais como estes, é possível determinar a quantidade de água presente na amostra.

(f) Ressonância nuclear magnética

Este método, também descrito por Nyström *et. al.* (2004), explica que átomos de hidrogênio se comportam como pequenos magnetos e alinham-se na presença de campo magnético com angulação específica. A alteração deste ângulo exige uma quantidade específica de energia, que, por sua vez, depende da intensidade do campo. O método conta, portanto, com a emissão de um campo magnético com intensidade constante (pode ser rádio frequência) e registra os movimentos dos átomos (espectroscopia).

3.3.3 Estado da arte – Resultados de outros autores

Jensen *et. al.* (2006) testaram a aplicação de diferentes métodos e modelos de medidores para diversos tipos de biomassa, dentre estes, cavacos de coníferas e cavacos de folhosas. Os valores de R^2 encontrados pelos autores para os medidores com sensores capacitivos dos modelos Pandis (Exotek, Alemanha) e Schaller (Schaller, Áustria) foram maiores que 90%. Para o medidor Pandis, o coeficiente de determinação foi igual a 96% e para o medidor Schaller, o valor típico estatístico foi de 92%. Os maiores teores de umidade investigados pelos autores foram próximos de 50% em base úmida.

Fuchs *et. al.* (2009) construíram três tipos de equipamentos para medir a umidade de pellets de madeira. O primeiro deles contava com sensores capacitivos planos distribuídos paralelamente que atuavam sobre a amostra disposta dentro de um recipiente. O segundo era semelhante ao primeiro equipamento, entretanto com sensores dispostos lado a lado. O terceiro, continha os sensores dispostos em forma de tubo para que atuassem sobre as amostras de pellets passando continuamente em esteira no interior do tubo. Para os sensores que atuavam sobre a amostra estativa dentro do recipiente, os autores observaram correlação entre capacitância e peso da amostra – e consequentemente, umidade. Os autores, ao contrário de alguns relatos como

os de Nystrom (2000), não observaram interferência da variação de densidade a granel das amostras.

Berbert *et. al.* (2009) avaliaram o princípio capacitivo para a medição de umidade de café. Os autores testaram diversas frequências na faixa de rádio frequência para a aplicação do método dielétrico. Em todas elas, os valores de R^2 foram maiores que 80% e, para a maioria dos testes, os modelos de equações relacionando a capacitância à umidade foram exponenciais.

Os modelos exponenciais também foram observados por Goltz (2014), que criou funções de medição para cavacos de madeira e para bagaço-de-cana e sorgo com equipamento do mesmo modelo utilizado no presente trabalho.

3.3.4 Comparação entre métodos

Nyström *et. al.* (2004) resumem algumas das informações industrialmente importantes para a escolha de um método para a medição de umidade de cavacos: a possibilidade de aplicação de sensores em linha, a possibilidade de leitura apenas por batelada ou amostragem ou de maneira contínua em um fluxo de cavacos, além do sucesso da aplicação de alguns deles, como mostra a Figura 5.

Método	Pode ser aplicado em linha?	Possibilidade de aplicação: por amostragem ou no fluxo de biomassa (continuamente)?	Sucesso reportado (precisão)	Referências
Gravimétrico	não	amostragem	2,5% (amostras de 100g) e 0,7% (amostras de 1000g)	SSI 187170, 1997
Duplo Raio-X	sim	amostragem (aproximadamente 2 kg)	2% (estimativa do autor referência)	Nordell, 2000
Indireto	sim	amostragem	1 a 2%	DIN 1942, 1979. Wester, 2001 Rindborg, 2003 apud Nyström, 2004
Dielétrico Capacitivo	sim	amostragem ou continuamente	0,1 a 6%	Beining <i>et. al.</i> , 2000 Ayalew <i>et. al.</i> , 2000 Antii, 1999 Hauksson <i>et. al.</i> , 2001 Axrup, 2000 Nyström <i>et. al.</i> , 2002 Axrup, 2000
NIR	sim	continuamente	0,3 a 7%	Nyström <i>et. al.</i> , 2002 Torgovnicov, 1993 Anagnostopoulou-Konsta <i>et. al.</i> , 1998 Tsutsumi <i>et. al.</i> , 1965 James <i>et. al.</i> , 1985 James <i>et. al.</i> , 1974 Backa <i>et. al.</i> , 1998 Wallance <i>et. al.</i> , 1980
Dielétrico com Microondas	sim	continuamente	2,1% (em madeira sólida)	Hollinger <i>et. al.</i> , 2000 Tiuri <i>et. al.</i> , 1982 Okamura <i>et. al.</i> , 2000 Johansson, 2001 Rehnberg, 2001 Toropainen, 1994 Baltes <i>et. al.</i> , 2000 Nelson <i>et. al.</i> , 2000
Ressonância Magnética Nuclear	sim	atualmente apenas por amostragem, mas pode ser adaptado	0,3% (estimativa dos autores referência para madeira sólida)	Rosenberg <i>et. al.</i> , 2001

FIGURA 5 – LISTA DE MÉTODOS PARA A MEDIÇÃO DE UMIDADE, POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO E SUCESSO REPORTADO

FONTE: Nyström *et. al.* (2004), adaptado pelo autor

3.4 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DA MADEIRA

Segundo Paz (2010), as propriedades dielétricas são intrínsecas aos materiais e podem, por isso, ser usadas para o desenvolvimento de modelos pré-definidos, os quais podem ser aplicados em técnicas de medição, como ocorre com os medidores de umidade baseados no método dielétrico que usa o princípio capacitivo.

Ulaby (2007) descreve as propriedades dielétricas de um material utilizando três conceitos: condutividade, permissividade e permeabilidade.

Condutividade é uma medida de quão fácil os elétrons podem viajar através de um material sob influência de um campo elétrico externo. Dependendo da condutividade, os materiais podem ser classificados em condutores, semicondutores ou isolantes elétricos, como é o caso da madeira (Ulaby, 2007).

Ao passo que a condutividade é termo ligado ao conceito de corrente elétrica, a permissividade é termo ligado a campo elétrico. Para Ulaby (2007), é uma medida de quanto uma distribuição de carga elétrica em um material é alterada pela aplicação de um campo elétrico. Jensen *et. al.* (2006) e Paz (2010) explicam que a permissividade (ϵ) representa a diferença entre a energia armazenada no campo elétrico, chamada de constante dielétrica (ϵ') e a energia que é dissipada sob influência de um dielétrico, chamada de fator de perda (ϵ''). Segundo Paz (2010), outra forma de entender a permissividade é uma medida da polarização que ocorre em um meio submetido a um campo elétrico. A polarização é um processo de distorção nas cargas elétricas de um material que tendem a se alinhar com o campo elétrico a que é submetido. A Figura 6 mostra, de forma didática, o processo de polarização em três passos: em (a), o dielétrico não está polarizado. Em (b), o campo elétrico aplicado ao dielétrico faz com que as cargas positivas se separem das cargas negativas nas moléculas do dielétrico. Em (c), o posicionamento das cargas internas do dielétrico provoca um campo elétrico no sentido contrário ao campo elétrico inicialmente emitido, criando assim um campo elétrico resultante menor que o inicial.

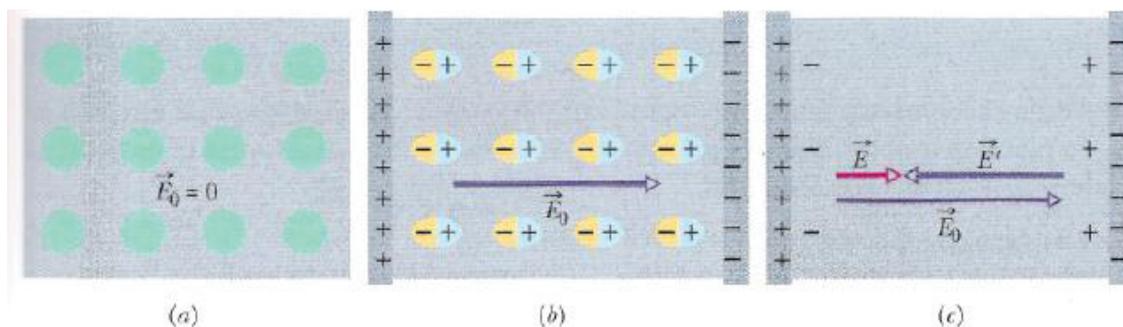


FIGURA 6 – POLARIZAÇÃO DE UM DIELETRICO: (A) DIELETRICO APOLAR. OS CIRCULOS REPRESENTAM OS ATOMOS ELETRICAMENTE NEUTROS NO MATERIAL. (B) AS PLACAS CARREGADAS DE UM CAPACITOR PRODUZEM UM CAMPO ELÉTRICO; O CAMPO SEPARA LIGEIRAMENTE AS CARGAS POSITIVAS DAS CARGAS NEGATIVAS DO MATERIAL. (C) A SEPARAÇÃO PRODUZ CARGAS NAS SUPERFÍCIES DO MATERIAL; AS CARGAS CRIAM UM CAMPO \vec{E}' , QUE SE OPÕE AO CAMPO APLICADO \vec{E}_0 . O CAMPO RESULTANTE É \vec{E} .

FONTE: Resnick *et. al.* (2012)

O comportamento dielétrico das células da madeira é típico de uma substância polar. Entretanto, segundo Paz (2010), a polarização na madeira é muito pequena se comparada à polarização da água e é por este motivo que este fenômeno permite a leitura da umidade da madeira através do método dielétrico com princípio capacitivo.

Segundo Ulaby (2007), a permeabilidade descreve a interação de um material com um campo magnético. É uma medida de magnetização ou ocorrência de momento magnético em um material sob a influência de um campo magnético. Todos os materiais respondem a campos magnéticos em certo grau, mas apenas materiais ferromagnéticos tem a permeabilidade variada significativamente quando comparados ao espaço vazio. Os demais materiais são chamados não magnéticos. Torgovnikov (1993), em seu livro, explica que a influência causada em um campo magnético aplicado sobre a madeira pode ser desprezada, já que a permeabilidade de dielétricos é comparável a espaços vazios. Por isso, o campo magnético não é considerado em medições com método dielétrico.

É importante destacar, entretanto, ainda segundo Paz (2010), que, apesar do fenômeno descrito, a resultante das propriedades dielétricas da madeira úmida não é a simples combinação das propriedades dielétricas da madeira seca e da água. A água tem propriedades termodinâmicas diferentes em materiais sólidos. Além disso, Wiley *et. al.* (1975) afirmam que o movimento da água acima do ponto de saturação das fibras é um fenômeno de explicação difícil, por envolver um grande número de fatores e variáveis que podem acrescentar fontes de erro não explicáveis em resultados experimentais. Por este motivo, muitos autores como James (1988), afirmam que medidores de umidade fornecem estimativa da umidade abaixo de 30% em base seca. Em contrapartida às dificuldades acima relatadas, Jensen *et. al.* (2006) trabalharam com medidores de umidade de princípio capacitivo de marcas diversas, obtendo coeficientes de determinação entre resultados dos instrumentos e resultados de método primário gravimétrico de 90%.

3.5 METROLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO

A investigação de um medidor de umidade de cavacos pertence ao ramo da instrumentação e da metrologia. Segundo Ribeiro (1999), instrumentação é o ramo da engenharia que trata do projeto, fabricação, especificação, montagem, operação e manutenção dos instrumentos para a medição, alarme, monitoração e controle das variáveis do processo industrial. E a metrologia, segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) (2012), é a ciência da medição e suas aplicações. A metrologia é controlada, no Brasil, segundo Vinge (2004), pelo Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (SINMETRO). O autor relata que o SINMETRO é constituído pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO) e pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

Como relatado anteriormente, no Brasil, o método tradicional e aceito pela ABNT para a determinação da umidade de cavacos de madeira é o método gravimétrico. Comparando resultados do método dielétrico e princípio capacitivo com resultados do método gravimétrico, é possível estabelecer, portanto, uma

hierarquia de calibrações que liga o método dielétrico a referências já estabelecidas de massa e temperatura. A Figura 7 mostra esta cadeia.

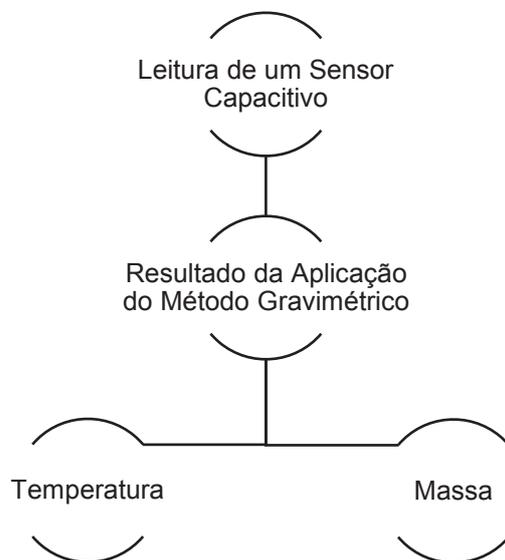


FIGURA 7 - HIERARQUIA DE CALIBRAÇÃO PARA UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE UMIDADE ATRAVÉS DO MÉTODO DIELÉTRICO COM PRINCÍPIO CAPACITIVO

FONTE: O Autor

É comum que os conceitos de curva de calibração e função de medição sejam confundidos. Enquanto, segundo o VIM (2012), curva de calibração é a expressão da relação entre uma indicação e o valor medido correspondente, a função de medição é uma função de uma grandeza de entrada (capacitância) e fornece o valor medido (umidade).

O guia para a expressão de incerteza de medição (JCGM 100, 2008), relata que a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor mensurado. Além da informação numérica da incerteza, há duas características de um grupo de dados essenciais para a análise de sua qualidade: a precisão e a exatidão. Segundo (VIM) (2012),

precisão é o grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas. Exatidão, todavia, é o grau de concordância entre um valor medido e um valor referência. De maneira simples, o desvio padrão pode ser usado como uma estatística para medir o quão preciso é um método e o erro relativo poderia ser usado para descrever o quão exato é um método. A Figura 8 evidencia diferenças entre grupos de dados exatos e grupos de dados precisos.

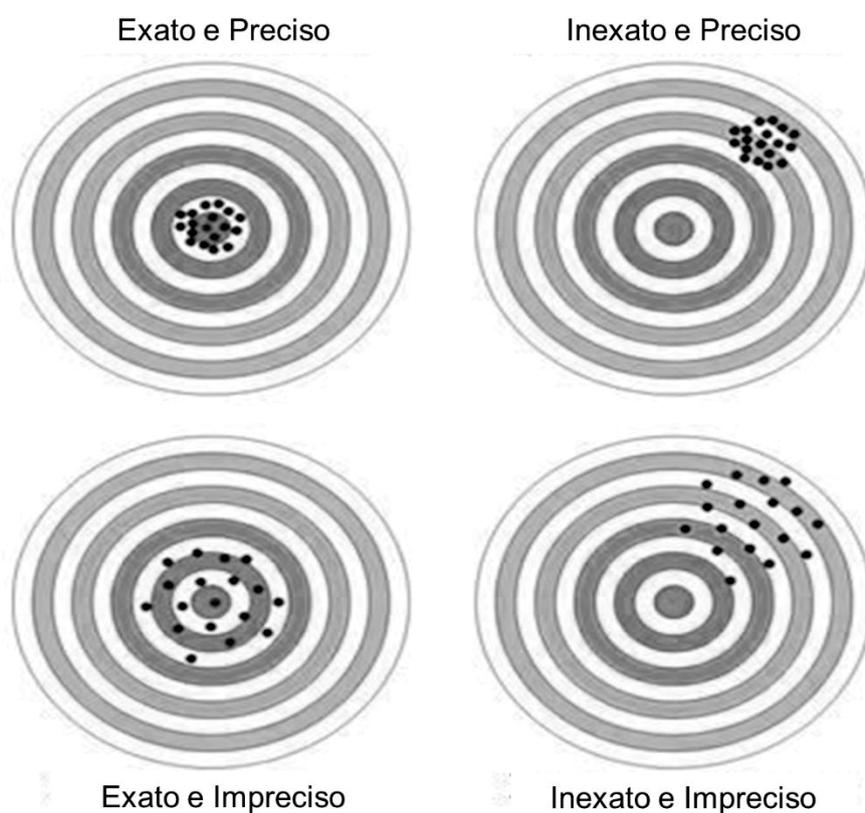


FIGURA 8 - DIFERENÇA ENTRE EXATIDÃO E PRECISÃO

FONTE: Bottega *et. al.* (2010)

3.6 MÉTODO DE PESQUISA

O presente trabalho questiona um método aplicado para a medição de umidade de cavacos de madeira através de pesquisa hipotético-dedutiva. Para Popper (1975), este método parte de um problema, ao qual se oferece uma espécie de solução provisória – uma teoria tentativa – e, a seguir, passa-se a criticar a solução visando à eliminação do erro. Lakatos *et. al.* (2003), baseados na proposição de Popper, esquematizam o método hipotético-dedutivo, como mostra a Figura 9.

A seguir, a Figura 10 representa o esquema adaptado com informações específicas sobre a presente pesquisa, onde parte-se do problema que é a falta de métodos válidos para a medição de umidade de cavacos, oferece-se a teoria tentativa de que o método dielétrico é adequado para esta medição e finalmente, critica-se esta solução através do questionamento dos resultados.

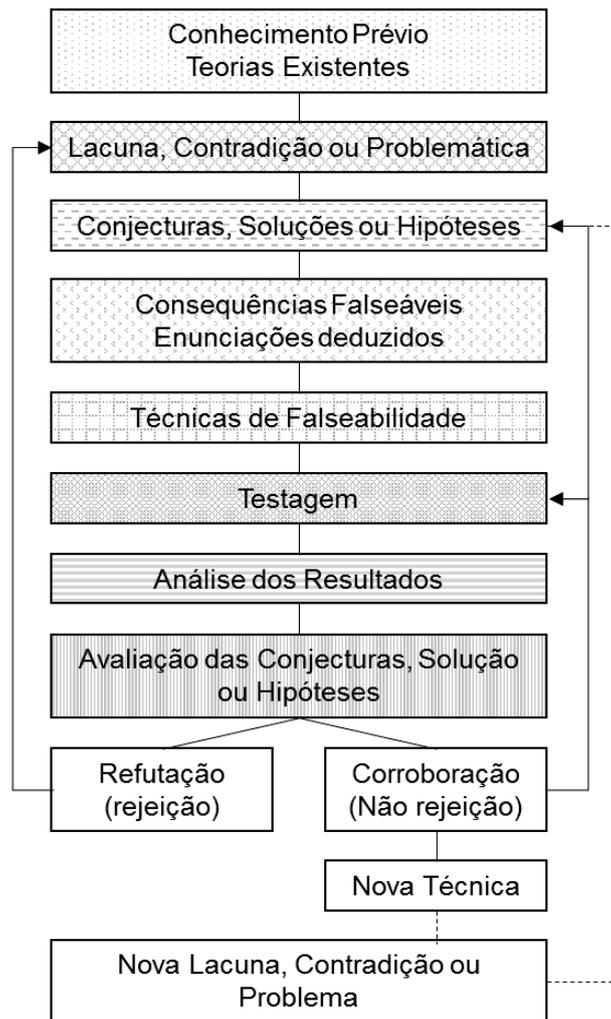


FIGURA 9 - ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA COM MÉTODO HIPOTÉTICO-DEDUTIVO

FONTE: adaptado de Lakatos *et. al.* (2003)

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento seguiu o método de pesquisa hipotético dedutivo e consistiu em duas etapas. A primeira foi o ajuste de um equipamento com sensor capacitivo através da definição de funções de medição para os cavacos estudados. A segunda etapa ocorreu em campo e foi a validação das funções de medição.

4.1 ROTEIRO DE ATIVIDADES

A Figura 10 representa o esquema de pesquisa hipotética dedutiva adaptado de Lakatos *et. al.* (2003), com informações específicas sobre a presente pesquisa, onde parte-se do problema que é a falta de métodos válidos para a medição de umidade de cavacos, oferece-se a teoria tentativa de que o método dielétrico é adequado para esta medição e finalmente, critica-se esta solução através do questionamento dos resultados.

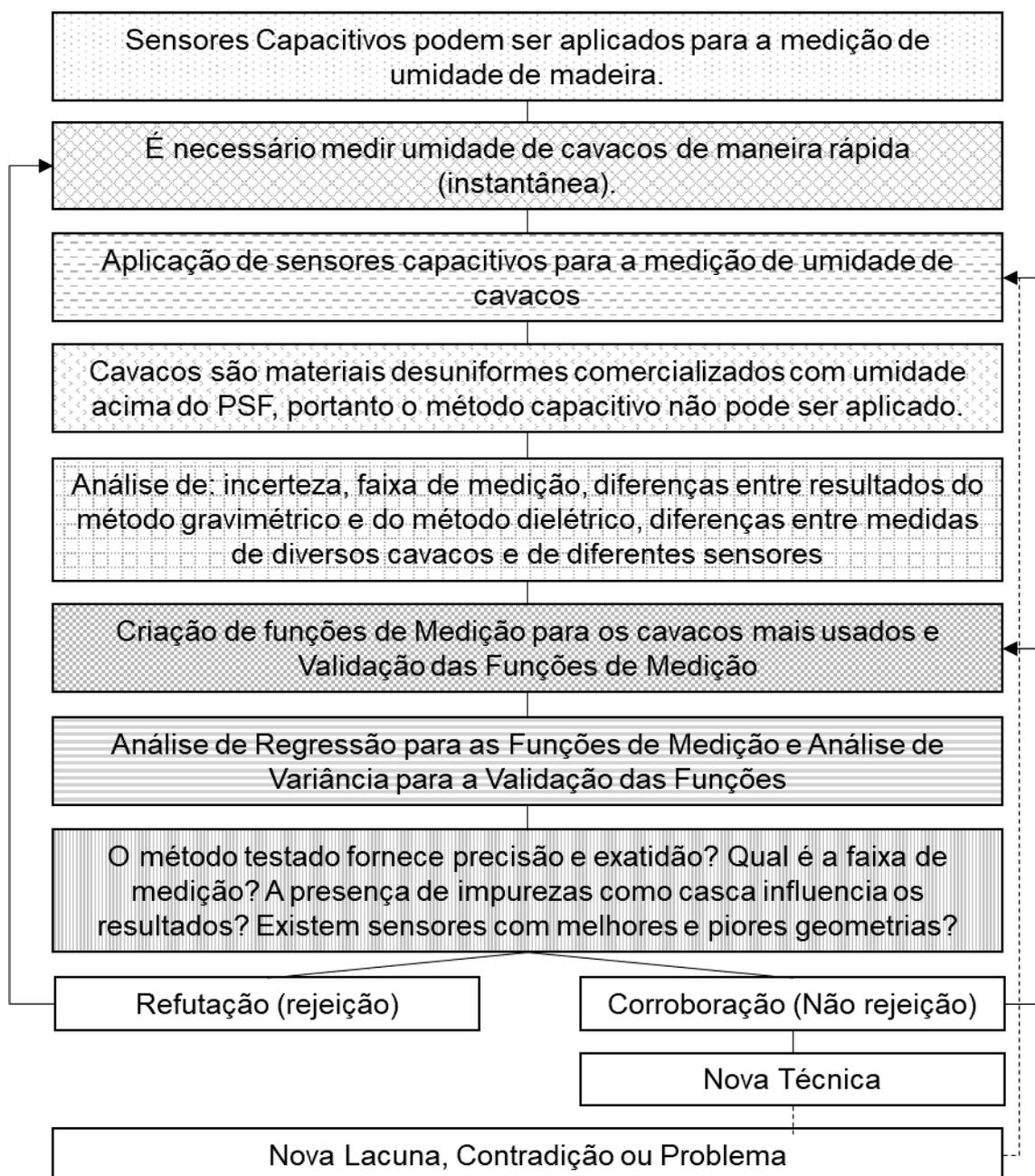


FIGURA 10 - ADAPTAÇÃO DO ESQUEMA DE PESQUISA HIPOTÉTICO-DEDUTIVA PARA O PRESENTE TRABALHO.

FONTE: O Autor

4.2 OBTENÇÃO DA UMIDADE PELO MÉTODO DIELÉTRICO COM MEDIDOR CAPACITIVO

O aparelho utilizado na pesquisa foi do modelo MUG M75 (MARRARI, Brasil). Trata-se de um equipamento portátil e possui o sensor capacitivo em formato cilíndrico no centro de um recipiente. A Figura 11 ilustra o equipamento e esquematisa seu princípio de funcionamento.

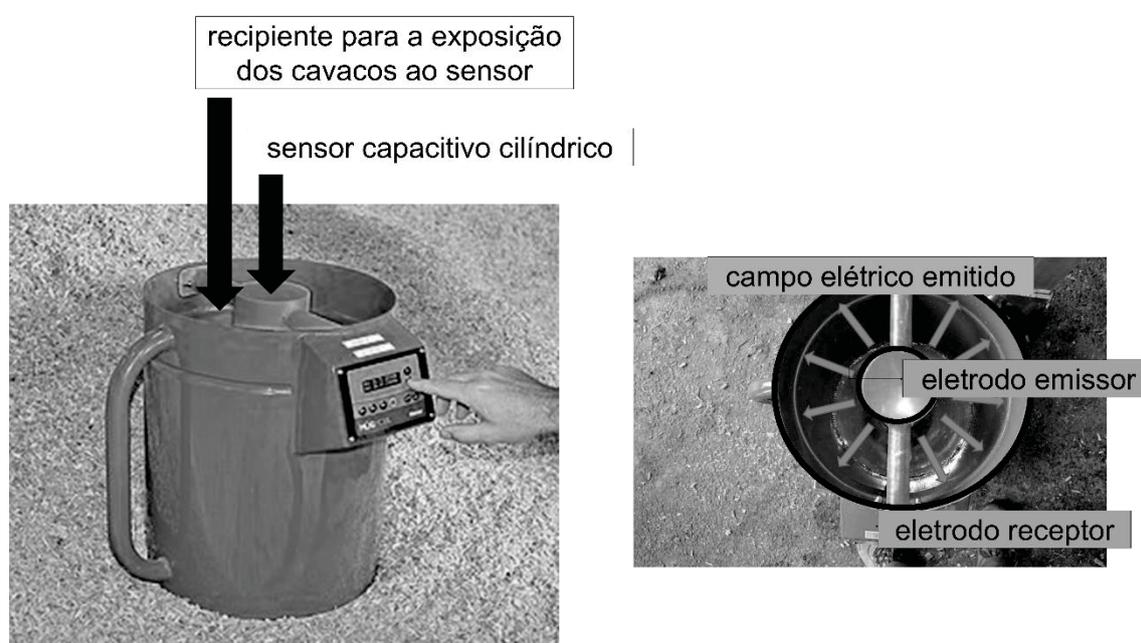


FIGURA 11 – MEDIDOR DE UMIDADE DE CAVACOS DO MODELO MUG M75 (MARRARI, BRASIL)

Fonte: O Autor

A leitura da perturbação no campo elétrico, causada pelo conteúdo de água no material dielétrico a ser medido, é disponibilizada na tela do medidor através do sinal digital dado em *bits*. Este número de *bits*, por sua vez, é convertido em umidade através de uma função de medição programada no equipamento. É possível cadastrar no equipamento diversas funções de medição, já que cada material apresenta uma equação de correlação diferente

entre *bits* e umidade, devido à influência de sua densidade na perturbação do campo elétrico emitido.

Para a configuração das funções de medição foi utilizado o modelo matemático exponencial proposto por Goltz (2014) que se baseou na utilização de cinco pontos distribuídos sobre a curva, nomeados de AM1, AM2, AM3, AM4 e AM5, para construção da curva, como pode ser observado na Figura 12.

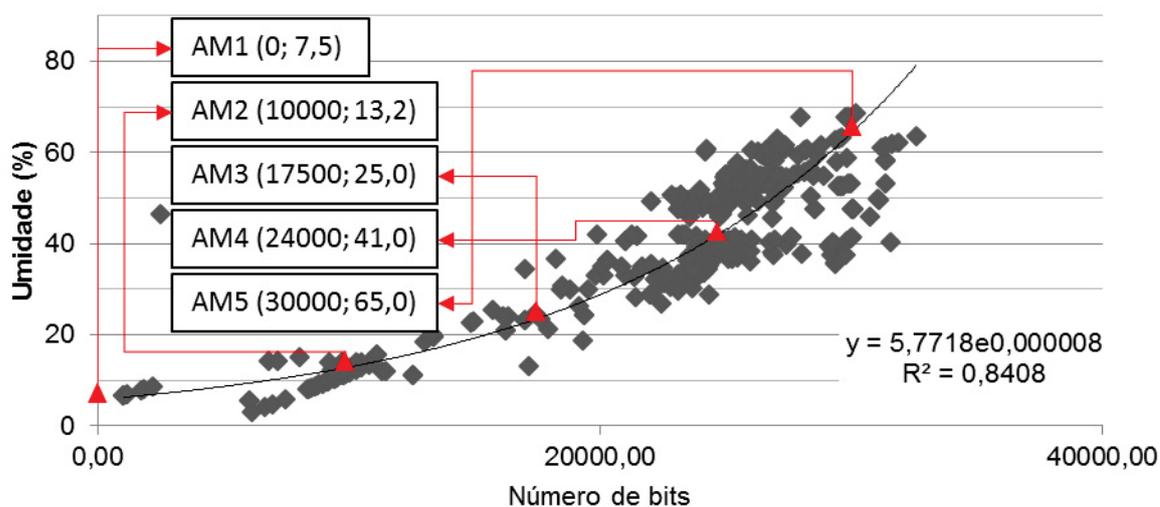


FIGURA 12 - PONTOS PARA A CONFIGURAÇÃO DE UMA FUNÇÃO DE MEDIÇÃO DE MODELO EXPONENCIAL NO MEDIDOR DE UMIDADE

Fonte: adaptado de Goltz (2014)

A umidade é normalmente expressa em base seca nas indústrias de painéis de madeira; em segura nas indústrias de celulose e em base úmida nas indústrias de biomassa para energia. Como a utilização deste modelo de medidor de umidade geralmente é na análise da umidade no momento da entrega de cavacos destinados à produção de energia, afim de corrigir o preço da biomassa conforme a umidade, o resultado de umidade é dado em base úmida. Além disso, o princípio capacitivo obtém resposta baseada na quantidade de água presente no dielétrico e não na quantidade dielétrico,

O tamanho da amostra utilizada na medição da umidade pelo aparelho dielétrico é de 35 litros. A operação consiste em:

- 1) Encher o recipiente com os cavacos, evitando qualquer compactação. A compactação pode causar alteração na densidade.
- 2) Selecionar na tela qual é a função de medição para aquele determinado material.
- 3) Salvar a leitura na memória do equipamento.
- 4) Gerar o relatório através do *software* que o acompanha.

4.3 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO

Para a determinação da umidade dos cavacos através do método gravimétrico, foram utilizadas uma balança com capacidade máxima de 1 kg e resolução de 0,1 g, uma estufa com circulação forçada de ar, capaz de manter a temperatura em $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e recipientes de alumínio para a pesagem com capacidade para cerca de 200g de amostra.

A análise da umidade seguiu a NBR 14929 (ABNT, 2017), iniciando pela coleta das amostras de cavacos, com a orientação da NBR 14660 (ABNT, 2004). As amostras eram armazenadas em sacos plásticos fechados para evitar perda de umidade. Cada amostra era pesada e imediatamente acondicionada na estufa a 103° , onde permanecia durante 24h. Apesar de a norma citar tempo de secagem de 16 até 24 horas, todas as amostras foram acondicionadas na estufa durante 24 horas afim de viabilizar uma rotina de trabalho mais fácil. Após este tempo, era retirada e colocada em dessecador até esfriar, para nova pesagem. Registrada a segunda pesagem, a amostra foi pesada novamente de duas em duas horas até a observação da massa final constante.

O método gravimétrico foi aplicado nas duas etapas deste trabalho. O objetivo da primeira etapa foi escolher as melhores equações para converter a leitura do sensor capacitivo em umidade. Esta umidade referência foi obtida através do método gravimétrico. Na segunda etapa, a medição da umidade foi realizada para comprovação da precisão da medição em campo.

4.4 COLETA DO MATERIAL

Na pesquisa foram usados os tipos de cavacos de madeira mais consumidos no Brasil: cavacos de pinus e de eucalipto destinados à fabricação de produtos nas indústrias de painéis de madeira e celulose (sem casca) e cavacos destinados à produção de biomassa para geração de energia (com casca). De cada tipo de cavaco, foram coletados 150 litros, os quais foram transportados em galões de 50 litros, desde o local de coleta até Curitiba, no Laboratório de Secagem da Madeira da Universidade Federal do Paraná, onde foi realizada a primeira etapa do trabalho.

Os cavacos de pinus sem casca foram coletados em uma fábrica de painéis MDF (*Medium density fiberbord*) e MDP (*Medium density particleboard*). O material foi obtido de florestas de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, com idades entre 18 e 23 anos, picados nas dimensões nominais de 30 x 30 x 5 mm (espessura, largura e comprimento). Os cavacos de eucalipto sem casca foram coletados na mesma fábrica de MDF e MDP e também foram picados com dimensões nominais de 30 x 30 x 5 mm. Estes foram provenientes de florestas de *Eucalyptus grandis*, com idades entre 6 a 7 anos. Os cavacos de pinus com casca foram subprodutos de serraria e tinham as mesmas dimensões dos demais. Os cavacos de eucalipto com casca foram coletados em uma fazenda produtora de biomassa para energia e também foram picados nas mesmas dimensões. Foram provenientes de árvores de *Eucalyptus dunnii*.

Os cavacos com casca, destinados à geração de energia, não apresentaram espécie ou idade definidas pelas empresas onde foram coletados.

4.5 ETAPA 1: ELABORAÇÃO DE FUNÇÕES DE MEDIÇÃO

4.5.1 Instalação do Experimento

As funções de medição foram elaboradas em laboratório, relacionando a incógnita umidade à leitura do sensor capacitivo, em *bits*, através de análise estatística de regressão. Para tanto, a coleta destes pares de informações precisou ser realizada em diversas situações de umidade, afim de cobrir a maior faixa de medição possível.

Cada um dos tipos de cavacos coletados foi dividido em três grandes amostras de 50 litros. Desta forma, ao total, foram utilizadas doze amostras: três repetições de cada um dos quatro tipos de cavacos. Cada uma das amostras foi exposta à secagem natural em triplicada durante 21 dias. Para a secagem, foram construídos quatro suportes (um para cada tipo de cavaco) com três divisórias (uma para cada repetição) com laterais de madeira e base de plástico, como mostra a Figura 13.

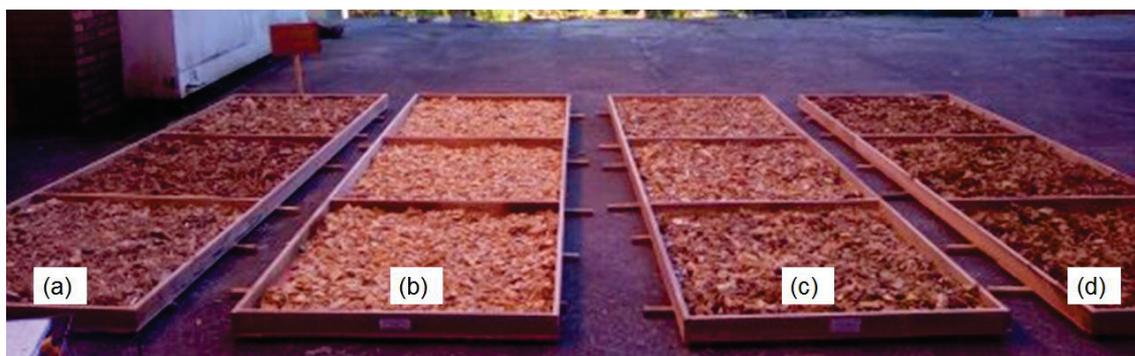


FIGURA 13 - INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO PARA A SECAGEM DOS CAVACOS: (A) CAVACOS DE EUCALIPTO SEM CASCA; (B) CAVACOS DE PINUS SEM CASCA; (C) CAVACOS DE PINUS COM CASCA; (D) CAVACOS DE EUCALIPTO COM CASCA

FONTE: O Autor

Os suportes foram planejados de forma que pudessem ser transportados para a exposição dos cavacos ao sol durante o dia – acelerando, assim, a secagem – e para proteção das amostras durante a noite.

4.5.2 Coleta de Dados

Durante a secagem, cada coleta de dados gerou um par de informações: leitura do sensor capacitivo, em *bits* e umidade determinada pelo método gravimétrico, em base úmida. O número de *bits*, que é o sinal processado da capacitância no momento da exposição da amostra ao campo elétrico, foi consultado no *display* do próprio equipamento, instantaneamente.

A cada coleta de dados, enchia-se o medidor dielétrico com cavacos de cada uma das amostras até que transbordasse e a seguir o excesso de cavacos era retirado de forma a deixar reta a superfície do recipiente, como mostra a Figura 14.

Não era exercida qualquer tipo de compactação extra, ou qualquer modificação na acomodação dos cavacos dentro do recipiente, afim de tornar repetitivo o procedimento de exposição das amostras ao sensor.



FIGURA 14 – ENCHIMENTO PADRÃO DO RECIPIENTE ONDE A AMOSTRA É EXPOSTA AO SENSOR PARA A COLETA LEITURA DO SENSOR EM *BITS*.

FONTE: O Autor

Em cada coleta, após realizar a leitura do sensor cilíndrico, uma subamostra com 200g cavacos foi coletada e armazenada em saco plástico para a determinação da umidade através do método gravimétrico.

4.5.3 Análise Estatística de Regressão

Para construir as funções de medição, foram aplicadas análises de regressão, onde a variável independente era a leitura do sensor (*bits*) e a variável dependente era a umidade obtida via método gravimétrico. Foi realizada também a análise de *outliers* usando o critério de *Chauvenet*. Como foram coletadas informações de quatro tipos de cavacos diferentes, foram elaboradas, ao total, quatro funções de medição. As funções foram elaboradas a partir do modelo exponencial, que foi sugerido por outros autores como Goltz (2014) para correlacionar capacitância e umidade em base úmida. As análises de regressão foram feitas através da 17ª versão do programa Minitab®.

4.6 ETAPA 2: VALIDAÇÃO DO MÉTODO DIELÉTRICO

A segunda etapa do presente trabalho foi realizada em campo, visando testar os modelos desenvolvidos na primeira etapa. Esta fase consistiu na aferição das leituras de umidade com o equipamento parametrizado conforme resultados da primeira etapa - tendo como testemunhas os resultados de umidade obtidos com método gravimétrico. Em cada uma das empresas onde os cavacos foram coletados, foram realizadas medições de umidade com o equipamento, usando método dielétrico, as quais foram pareadas com medições em laboratório, usando método gravimétrico.

4.6.1 Coleta de Dados

Para cada tipo de cavaco foram realizadas cinco leituras de umidade com o equipamento em cada um dos diferentes pontos selecionados na pilha de cavacos, como mostra a Figura 15. Após cada leitura com o sensor, uma subamostra foi coletada para a determinação da umidade através do método gravimétrico, em laboratório. Tanto as leituras de umidade em campo quanto as análises de umidade em laboratório foram realizadas em triplicata. As subamostras foram armazenadas em sacos plásticos e em caixa de isopor durante o deslocamento das empresas até o Laboratório de Secagem da Madeira da Universidade Federal do Paraná. Esta sequência é exibida na Figura 16.

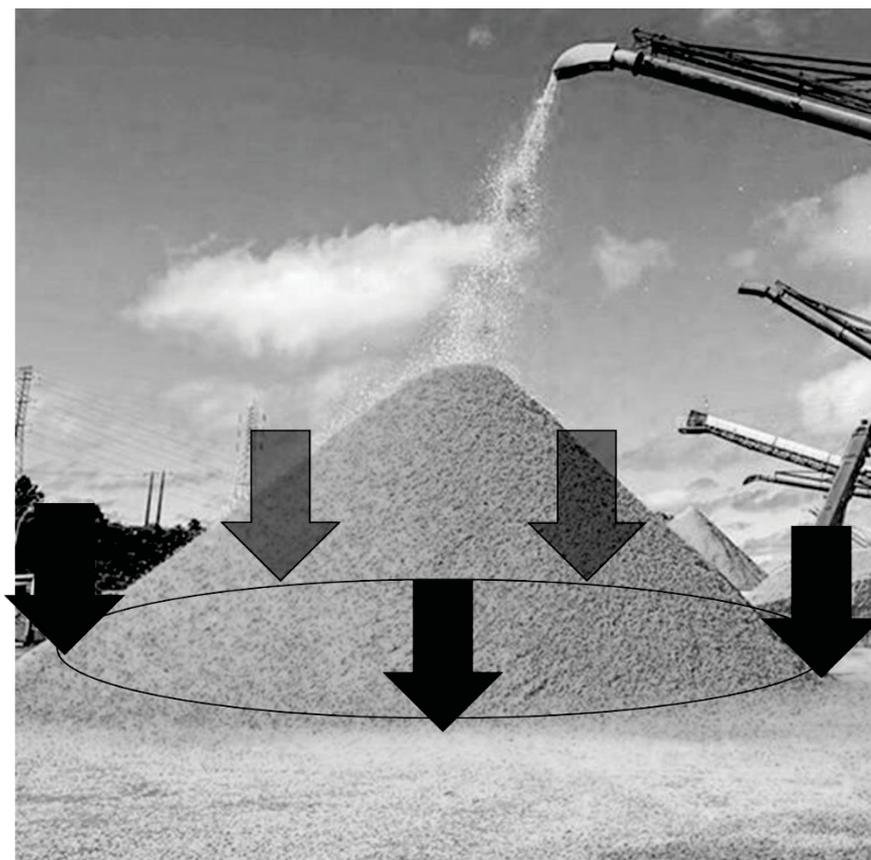


FIGURA 15 - DIFERENTES PONTOS NO PÁTIO DE CAVACOS ONDE FORAM COLETADAS AS LEITURAS DE UMIDADE COM O MEDIDOR DIELÉTRICO

FONTE: Klabin (2017), adaptado pelo autor

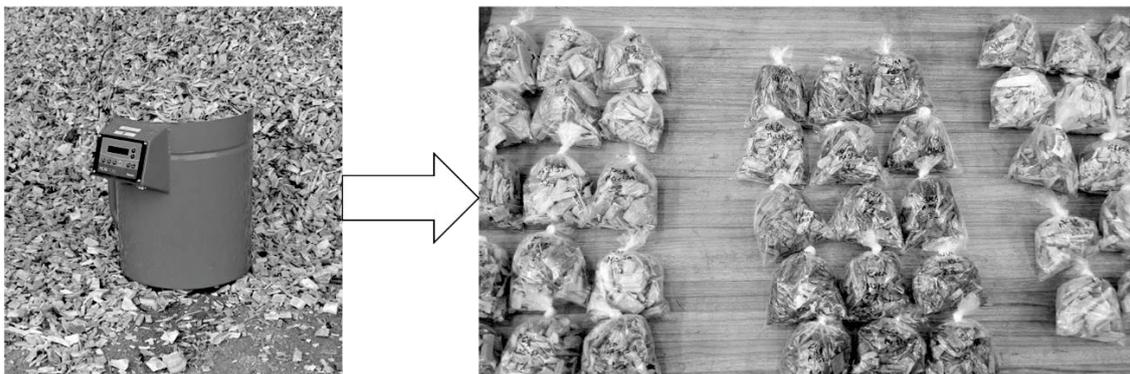


FIGURA 16 - SEQUÊNCIA DE MEDIÇÕES: PRIMEIRAMENTE FORAM COLETADAS LEITURAS DE UMIDADE COM O SENSOR CAPACITIVO E A SEGUIR SUBAMOSTRAS FORAM LEVADAS AO LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO

FONTE: O Autor

4.6.2 Análise Estatística de Variância

Foi escolhida a ferramenta estatística de análise de variância (ANOVA), já que esta fornece dados que inferem se o método dielétrico é exato e quão preciso ele é. A investigação da exatidão considerou como referência o método gravimétrico. A investigação da precisão considerou dados de desvio padrão das medidas.

De acordo com a ferramenta estatística escolhida e com a coleta de dados realizada, a análise de variância (ANOVA) foi organizada como mostra a Figura 17.

Conceito	Nº	Identificação
fatores	1	umidade
tratamentos	2	método gravimétrico e método dielétrico
níveis	5	pontos na pilha de cavacos com diferentes teores de umidade
repetições	3	para cada dado levantado

FIGURA 17 - ORGANIZAÇÃO DA ANOVA PARA A VALIDAÇÃO DO MÉTODO DIELÉTRICO: NÚMERO DE FATORES, TRATAMENTOS, NÍVEIS E REPETIÇÕES

FONTE: O Autor

Afim de garantir a robustez e perfeito funcionamento da ferramenta estatística, antes de aplicá-la, primeiramente foram verificados: dependência entre amostras dos dois tratamentos, igualdade de variâncias com correção Bonferroni e distribuição normal das diferenças entre os tratamentos (erros) usando o teste de Anderson-Darling. Uma vez constatada independência entre amostras, igualdade de variâncias e normalidade dos resíduos, foi realizada análise de variância, seguida de teste T independente de Tukey.

5 RESULTADOS E E DISCUSSÃO

5.1 ELABORAÇÃO DE FUNÇÕES DE MEDIÇÃO

Na Tabela 2 encontram-se os pares de pontos utilizados para elaborar as funções de medição, que correlacionam a leitura em *bits* com resultados de umidade pelo método gravimétrico, para cada tipo de cavaco. A coleta de dados para a elaboração das funções teve duração de três meses. Neste período foram realizadas 21 coletas de *bits* e umidade.

TABELA 2 - LEITURA EM *BITS* E UMIDADE EM BASE ÚMIDA DURANTE A SECAGEM DE CADA TIPO DE CAVACO

Coleta	pinus sem casca		pinus com casca		eucalipto sem casca		eucalipto com casca	
	Bits	Umidade em base úmida (%)	Bits	Umidade em base úmida (%)	Bits	Umidade em base úmida (%)	Bits	Umidade em base úmida (%)
1	28868	61,00	26737	47,47	28873	50,74	28100	43,37
2	27770	56,27	26470	44,71	30070	49,82	28520	40,25
3	26160	55,72	24373	44,01	27867	41,29	27653	40,11
4	27740	55,56	24117	43,19	24473	41,10	28977	39,83
5	25333	52,95	23940	37,50	25603	38,45	26940	39,67
6	25310	52,37	21843	33,10	26683	38,00	26213	34,18
7	25177	49,59	21450	32,71	24240	36,95	26567	33,36
8	25363	47,50	19543	32,01	25020	30,06	24663	33,25
9	21373	33,72	19927	30,19	18107	29,63	24710	31,92
10	19880	29,52	18597	27,79	21327	28,20	22587	29,31
11	17867	26,02	20290	27,14	19267	24,54	20487	27,26
12	17513	24,02	19373	25,19	18653	23,42	24263	26,01
13	16140	23,69	17833	24,01	16937	22,19	22120	24,18
14	10607	21,23	16573	23,08	15713	19,78	21604	23,46
15	15860	20,97	14700	21,68	16063	19,11	18467	21,08
16	14050	19,61	15693	20,80	12040	16,41	12033	18,70
17	10580	16,54	13527	18,56	11177	16,24	13023	16,49
18	10710	16,22	11863	16,30	11233	15,90	12837	16,32
19	10997	15,99	11967	13,93	11483	14,34	12413	15,86
20	10380	15,54	10917	13,52	10493	13,90	12030	14,97
21	10770	15,23	10617	13,02	9740	13,28	12430	13,52

FONTE: O Autor

Nesta fase é importante ressaltar que mais do que funções de medição, foram obtidas curvas de secagem para cada um dos quatro tipos de cavacos analisados, já que a informação da umidade foi acompanhada desde a sua condição verde até a umidade de equilíbrio.

5.1.1 Curvas de Secagem dos Cavacos

Nas figuras 18 e 19, são apresentadas as curvas de secagem para os cavacos de pinus e eucalipto, relacionando o tempo de secagem à umidade das amostras determinada pelo método gravimétrico.

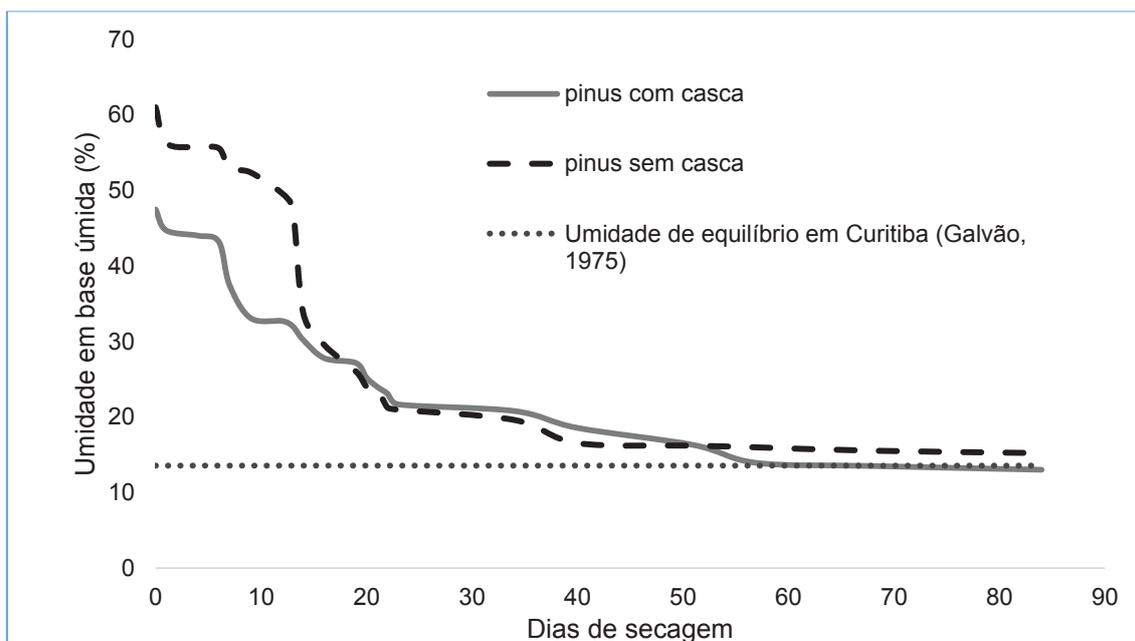


FIGURA 18 - CURVAS DE SECAGEM PARA CAVACOS DE PINUS COM E SEM CASCA

FONTE: O Autor

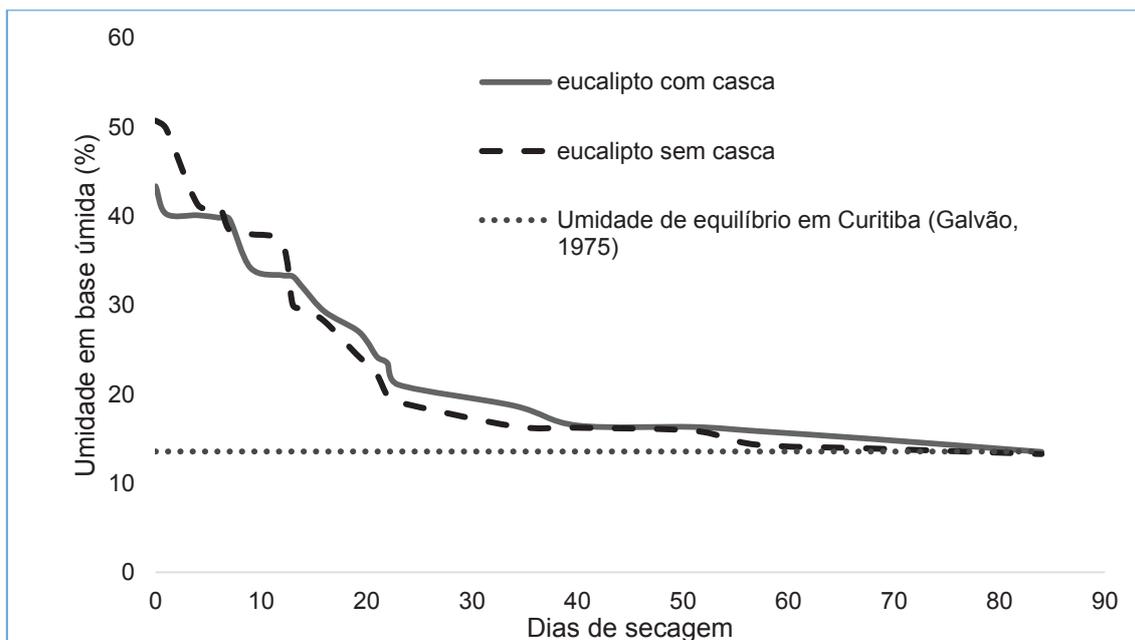


FIGURA 19 - CURVAS DE SECAGEM PARA CAVACOS DE EUCALIPTO COM E SEM CASCA

FONTE: O Autor

Na Figura 18, percebe-se que a amplitude de umidade para os cavacos sem casca foi de 60% até aproximadamente 15% em base úmida. Para os cavacos com casca, a amplitude foi menor, iniciando em 50%. O mesmo aconteceu para os cavacos de eucalipto, na Figura 19, onde os cavacos sem casca estavam a 50% no início do experimento e os cavacos com casca estavam a apenas 45%. Furtado *et. al.* (2012) mediram a umidade de diferentes partes de árvores de *Pinus taeda* separadamente e concluíram que a casca apresentou menor umidade que o xilema da árvore. Este relato explica o menor intervalo de umidade exibido nas Figuras 18 e 19 para os cavacos com casca, quando comparados aos cavacos sem casca.

Além disso, os diferentes teores de umidade observados no início da secagem para os diferentes tipos de cavacos são justificados pela proveniência de materiais de diversas fábricas que não possuíam o controle do tempo de derrubada, transporte e estocagem em pátio. Entretanto, estes valores de umidade inicial são condizentes com os estudos de diversos autores. Para os cavacos de pinus, foram encontradas no início deste experimento umidades

entre 47,47% e 61,00% em base úmida. Calegari *et al.* (2007) registraram valores de 59,03% e 60,50% (144,10% e 153,15% em base seca). Para os cavacos de eucalipto, foram encontrados valores entre 43,37% e 50,74% neste trabalho, enquanto Oliveira *et al.* (2005) observaram valores entre 38,27% e 50,50% (62,00% e 102,00% em base seca). Ao final da secagem, todos os tipos de cavacos chegaram à umidade próxima de 13,00% em base úmida, resultado este que coincide com a conclusão de Galvão (1975), que obteve umidade de equilíbrio igual a 13,57% (15,70% em base seca) para o mesmo mês em que foi finalizada esta etapa do trabalho em Curitiba-PR.

A secagem natural dos cavacos teve início em junho e foi finalizada em agosto de 2017. O experimento foi finalizado com 84 dias, quando a umidade dos cavacos de eucalipto se mostrou estável (Figura 19), é possível verificar que a umidade dos cavacos de pinus se encontrava estável desde o 55º dia de experimento (Figura 18). Zanuncio *et al.* (2016) relatam que as características anatômicas da madeira estão relacionadas à perda de umidade em todas as fases da secagem.

A mais demorada estabilidade da umidade dos cavacos de eucalipto pode ser atribuída a diversos fatores. O primeiro deles pode ser listado como a presença de pontoações de pequeno diâmetro que dificultam o deslocamento da água por capilaridade ou na forma líquida. Para Oliveira *et al.* (2001) é este o motivo pelo qual madeiras do gênero *Eucalyptus* apresentam mais dificuldades na secagem. O segundo fator ao qual se pode atribuir a lenta secagem dos cavacos de eucalipto é a presença de tiloses, relatada por Alfonso (1987). Relaciona-se com os dois primeiros motivos listados o fato de que madeiras de eucalipto apresentam maior ocorrência de cerne que madeiras de pinus, com conseqüente maior quantidade de extrativos, que provocam ligações químicas que dificultam e bloqueiam a saída da água. Como um terceiro e último motivo, poder-se-ia listar também a maior hidrofília dos cavacos de eucalipto em comparação com os cavacos de pinus. Apesar desta contribuição ser menor que as demais, acima citadas, é importante lembrar que, para Borges *et al.* (2004), o constituinte mais hidrófilo da madeira é a hemicelulose e, segundo Goldstein *et al.* (1977), enquanto madeiras de eucalipto possuem em média 30% de seu material constituído por hemicelulose, madeiras de pinus possuem apenas 27%.

Como era esperado, a velocidade de secagem para todos os quatro tipos de cavaco até 20% de umidade em base úmida observada neste trabalho foi mais alta que a velocidade de secagem registrada para madeira serrada, já que os cavacos possuem maior superfície exposta ao ar. Para os cavacos de eucalipto, por exemplo, foram necessários apenas 25 dias para que a umidade do material decaísse de 50% até 20% em base úmida, enquanto o mesmo tempo para outros autores é próximo de 65 dias. Zen (2015) registrou a secagem de 32% até 23% em base úmida em 65 dias e Duarte *et. al.* registrou 63 dias para secar madeira serrada de 35% até 15%.

5.1.2 Análise Estatística de Regressão

Durante a secagem dos cavacos, simultaneamente aos registros do teor de umidade, foram registradas as leituras do sensor em *bits* (Tabela 2), o que possibilitou a correlação entre estas duas variáveis e a elaboração de uma função de medição para cada tipo de cavaco, através de regressão linear com nível de significância fixado em 5%, as quais são apresentadas nas Figuras 20 e 21.

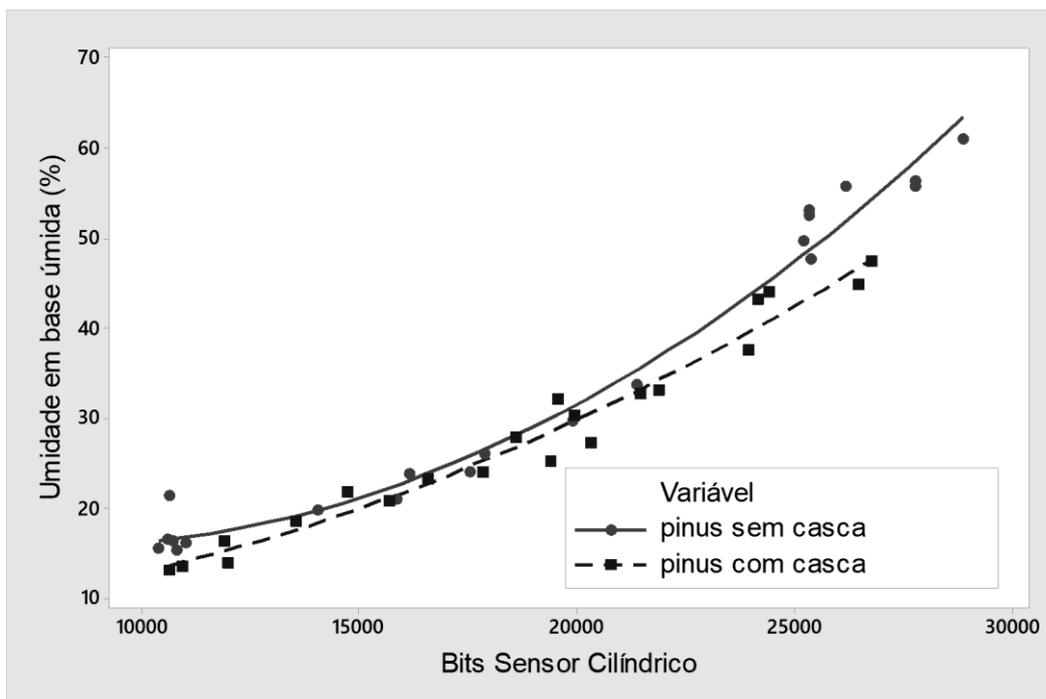


FIGURA 20 - FUNÇÕES DE MEDIÇÃO PARA CAVACOS DE PINUS COM E SEM CASCA

FONTE: O Autor

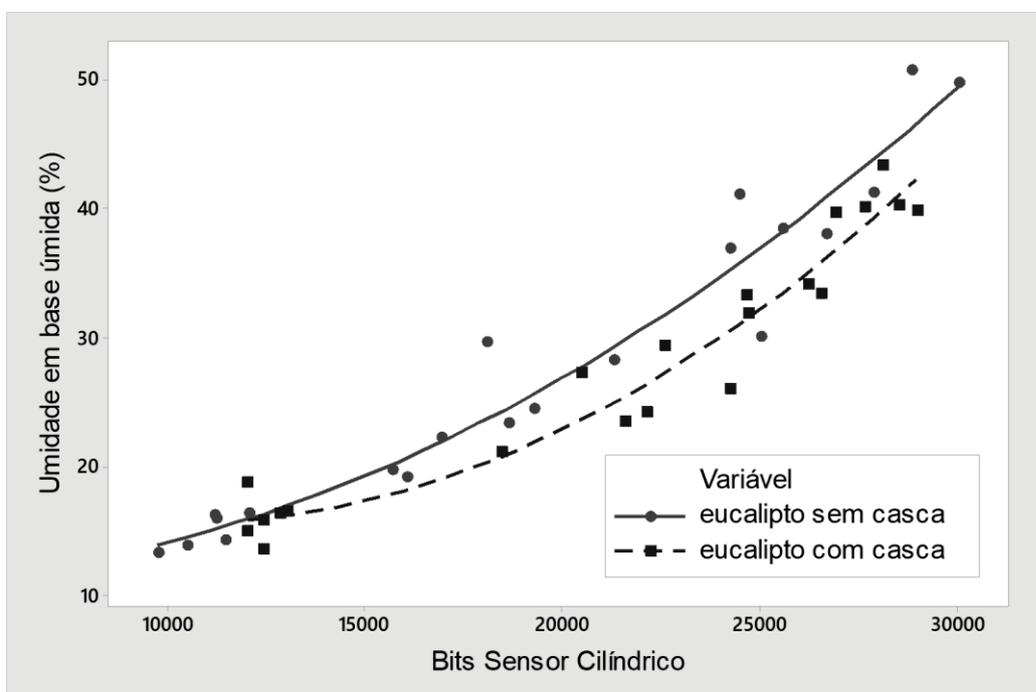


FIGURA 21 - FUNÇÕES DE MEDIÇÃO PARA CAVACOS DE EUCALIPTO COM E SEM CASCA

FONTE: O Autor

Visualmente seria possível prever, através das Figuras 20 e 21, que não há *outliers* na análise de regressão, que poderiam ter sido causados por erros na coleta da leitura em *bits* ou erros no ensaio em laboratório. Esta conclusão pode ser confirmada através da aplicação do critério de *Chauvenet*, que indica a ausência de *outliers* e a contribuição da totalidade dos dados para a elaboração das funções de medição para o equipamento.

É possível verificar na Figura 20 que as duas funções de medição para pinus com e sem casca foram semelhantes na faixa de 15 e 30% de umidade. Entretanto, em umidades maiores, a resposta da leitura do sensor em *bits* em relação à variação da umidade foi mais sensível para cavacos sem casca. O mesmo ocorreu para os cavacos de eucalipto, não somente em faixas maiores de umidade como em toda a faixa medida. Segundo Berbert *et. al.* (2007), a calibração dos medidores de umidade com sensores capacitivos existentes no mercado usa uma equação diferente para cada tipo de material, porque variações na massa específica aparente resultam em significativos erros de medição. Além dos valores de massa específica serem diferentes para os dois gêneros, a casca possui propriedades físicas diferentes da madeira, como exemplifica Vale *et. al.* (2002) em seu trabalho. Optou-se, portanto, pela utilização de quatro funções de medição separadas, para cavacos de pinus e de eucalipto, com e sem casca, cujas informações para analisar a qualidade de cada função de medição se encontram na Tabela 3.

TABELA 3 – FUNÇÕES DE MEDIÇÃO PARA CADA TIPO DE CAVACO E SEUS VALORES TÍPICOS

Cavacos	Equação resultante da análise de regressão	Valor P	Coefficiente de determinação (R ²)	Desvio-padrão dos resíduos (S)	Intervalo de variação dos resíduos
Pinus sem casca	$U = (7,2178 \cdot e^{(-0,00007 \cdot bits)})$	0,00	0,94	4,09	-6,22 a 7,50
Pinus com casca	$U = (6,0874 \cdot e^{(-0,00008 \cdot bits)})$	0,00	0,95	2,30	-4,34 a 4,36
Eucalipto sem casca	$U = (7,4495 \cdot e^{(-0,00006 \cdot bits)})$	0,00	0,92	2,95	-6,68 a 5,25
Eucalipto com casca	$U = (7,6102 \cdot e^{(-0,00006 \cdot bits)})$	0,00	0,90	2,76	-5,69 a 4,28

FONTE: O Autor

O melhor modelo encontrado na análise de regressão foi o modelo exponencial, condizente com as conclusões de Goltz (2014). Afim de atender o comportamento exponencial das equações resultantes da análise de regressão, foram escolhidos para a parametrização do equipamento cinco pontos, chamados de AM1, AM2, AM3, AM4 e AM5, igualmente distribuídos sobre a curva que correlaciona *bits* e umidade, como mostra a Figura 22.

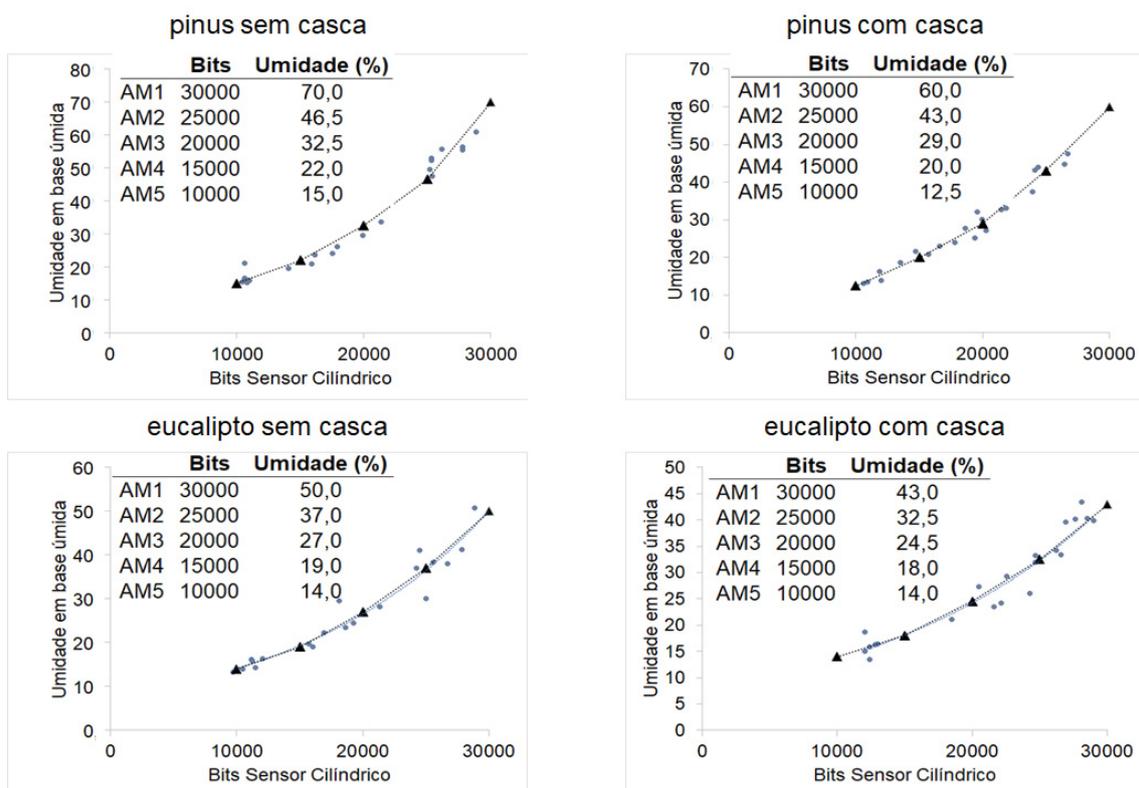


FIGURA 22 – PONTOS AM1, AM2, AM3, AM4 E AM5 ESCOLHIDOS SOBRE A CURVA DE CORRELAÇÃO ENTRE *BITS* E UMIDADE PARA PARAMETRIZAR O MEDIDOR DE UMIDADE PARA CADA TIPO DE CAVACO

FONTE: O Autor

Berbert *et. al.* (2007), explicam as medições de um sensor capacitivo através da facilidade com que o dielétrico (cavacos) permite o estabelecimento de um campo elétrico em seu interior. É condizente, portanto, que o modelo que melhor representa a correlação entre *bits* e umidade seja exponencial. Quando os cavacos estão mais secos, a quantidade do material isolante, que é a madeira, é maior e a quantidade do material condutor, que é a água, é menor.

Esta proporção torna mais difícil o estabelecimento de um campo elétrico e justifica a necessidade de uma pequena variação no teor de umidade para que aumente a leitura em *bits*. Quando os cavacos estão mais úmidos, acontece a situação inversa e é necessária maior variação no teor de umidade para um pequeno aumento da leitura em *bits*.

No presente estudo, a hipótese nula significa a ausência de correlação entre o número de *bits* e a umidade dos cavacos e sua rejeição é a evidência de correlação entre estas variáveis. Os valores P encontrados para todos os tipos de cavaco apontam para a rejeição da hipótese nula, ou existência de correlação entre as variáveis, já que os valores P iguais a 0% foram menores que o nível de significância de 5% fixado para a análise estatística. Estes níveis descritivos resultando em 0% indicam que mesmo que a análise fosse realizada com nível de significância fixado em 0%, ter-se-ia 100% de certeza sobre a rejeição da hipótese nula. Ou seja, seria possível afirmar com certeza absoluta que existe correlação entre a leitura em *bits* dos quatro tipos de cavacos e sua umidade.

Apesar da afirmação de James (1988) sobre a impossibilidade da medição de madeiras com umidade superior a 30%; os resultados aqui encontrados – 94%; 95%; 92% e 90% para cavacos de pinus sem caca, pinus com casca, eucalipto sem casca e eucalipto com casca, respectivamente - apresentaram coeficientes de determinação R^2 maiores que 90% em faixas de umidade até 50%. Ou seja, a leitura do sensor capacitivo explica mais que 90% das informações de umidade dos cavacos analisados. Esta diferença entre qualidade de medições encontradas em 1988 e 2017 pode ser atribuída principalmente à evolução de componentes eletrônicos de sensor e de conversão de sinais analógicos para digitais, que ocorreu de maneira intensa nas últimas décadas. Tanto para coníferas quanto para folhosas, os valores de R^2 encontrados por Jensen *et. al.* (2006) foram também maiores que 90%: 96% usando o medidor Pandis (Exotek, Alemanha) e 92% usando o medidor Schaller (Schaller, Áustria).

Os resíduos da análise de regressão representam a diferença entre o resultado que seria exibido no medidor capacitivo utilizando-se a equação escolhida e o real valor da umidade obtido via método gravimétrico. Os resultados de desvio padrão dos resíduos obtidos no presente trabalho foram

semelhantes aos resultados encontrados por Jensen *et. al.* (2006), que também submeteram cavacos de coníferas e de folhosas à análise da umidade com medidores capacitivos. Todos estes valores são apresentados na Figura 23.

Trabalho	Medidor capacitivo	Tipo de cavaco	Desvio padrão dos resíduos
Jensen <i>et. al.</i> (2006)	Pandis (Exotek, Alemanha)	coníferas	3,02
		folhosas	2,38
	Schaller (Schaller, Austria)	coníferas	2,44
		folhosas	2,50
Presente trabalho	MUG M75 (Marrari, Brasil)	pinus sem casca	4,09
		pinus com casca	2,30
		eucalipto sem casca	2,95
		eucalipto com casca	2,76

FIGURA 23 - VALORES DE DESVIO-PADRÃO DOS RESÍDUOS PARA A MEDIÇÃO DE UMIDADE COM MEDIDOR CAPACITIVO NO TRABALHO EM DOIS TRABALHOS PUBLICADOS

FONTE: O Autor, adaptado de Jensen *et. al.* (2006)

Aplicando o teste de normalidade de Anderson Darling para os resíduos da regressão, percebe-se que para os quatro tipos de cavaco os valores de resíduos apresentaram distribuição normal, como mostra a Figura 24.

Ao comparar a distribuição dos resíduos com a curva normal, é possível prever, portanto, quais seriam os erros do medidor para cada tipo de cavaco, cujos valores são apresentados na Tabela 4. Observa-se que no pior caso – cavacos de pinus sem casca - a umidade de quase 99,73% das amostras pode ser determinada pelo princípio capacitivo com precisão de aproximadamente 12 pontos percentuais.

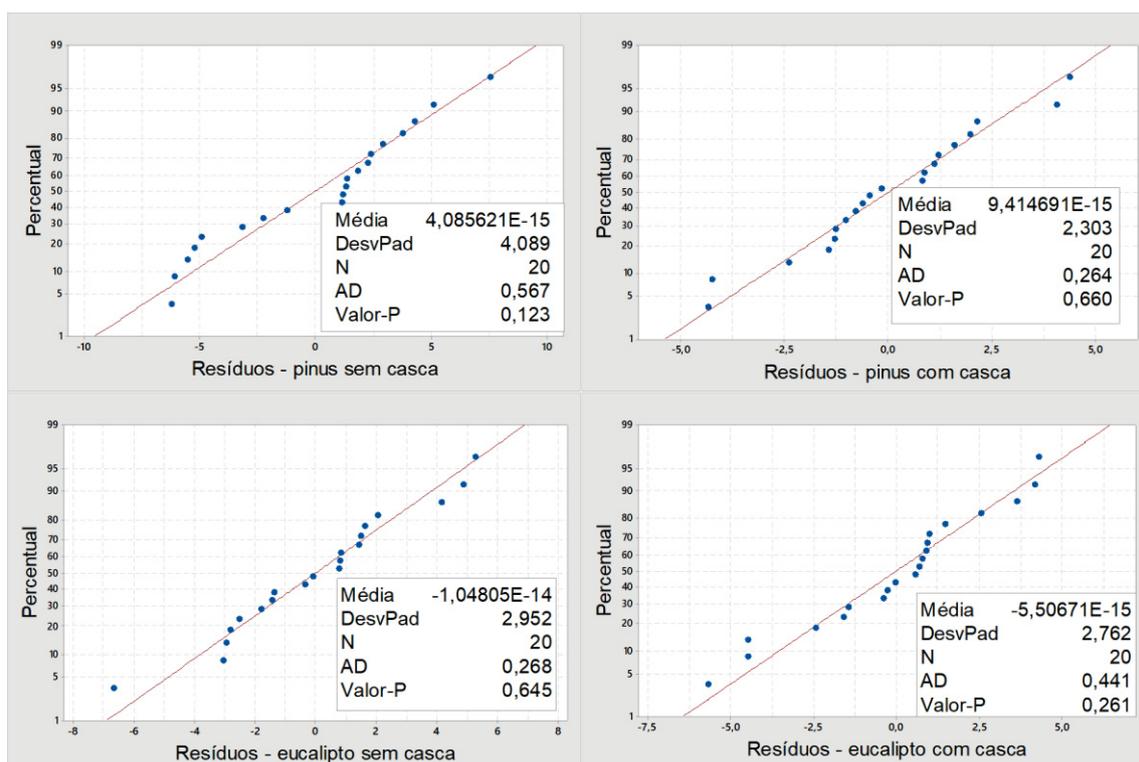


FIGURA 24 - TESTE DE NORMALIDADE PARA RESÍDUOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA CADA TIPO DE CAVACO

FONTE: O Autor

TABELA 4 - ERROS PREVISTOS DO MEDIDOR COM SENSOR CAPACITIVO PARA CADA TIPO DE CAVACO

Percentual de leituras realizadas, seguindo curva normal	Erro previsto			
	Pinus sem casca	Pinus com casca	Eucalypto sem casca	Eucalypto com casca
68,26 % ($\pm 1 \sigma$)	4,09	2,30	2,95	2,76
95,44 % ($\pm 2 \sigma$)	8,18	4,60	5,90	5,52
99,73 % ($\pm 3 \sigma$)	12,27	6,90	8,85	8,28

FONTE: O Autor

Na Tabela 5 fica evidente a relação entre a faixa de umidade abrangida pelo presente ensaio e a faixa de variação dos resíduos. O maior valor de erro previsto ocorreu exatamente para a função de medição elaborada com a maior faixa de umidade.

TABELA 5 - RELAÇÃO ENTRE A FAIXA DE MEDIÇÃO DE UMIDADE, A FAIXA DE VARIAÇÃO DOS RESÍDUOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO E O DESVIO PADRÃO DOS RESÍDUOS OU ERRO ESPERADO DO MEDIDOR

Tipo de cavaco	Intervalo de medição de umidade em base úmida (%)	Intervalo de variação dos resíduos	Desvio Padrão
Pinus sem casca	15,23 a 61,00	-6,22 a 7,50	4,09
Pinus com casca	13,02 a 47,47	-4,34 a 4,36	2,30
Eucalipto sem casca	13,28 a 50,74	-6,68 a 5,25	2,95
Eucalipto com casca	13,52 a 43,37	-5,69 a 4,28	2,76

FONTE: O Autor

Enquanto os demais tipos de cavacos tiveram funções de medição elaboradas em faixas de 15 a 50% de umidade em base úmida, a faixa de medição dos cavacos de pinus sem casca foi até 61 %. Sabe-se que a madeira se comporta como material dielétrico polar e que, segundo Paz (2010), o princípio capacitivo só funciona porque a polarização na madeira é muito pequena se comparada à polarização da água. Entretanto, quanto maior a quantidade de água na madeira, mais difícil se torna a explicação do fenômeno do gradiente de umidade (Wiley *et. al.*,1975). Paz (2010) lembra ainda que a resultante das propriedades dielétricas da madeira úmida não é a simples combinação das propriedades dielétricas da madeira seca e da água. Tais relatos explicam a maior previsão de erros para a maior faixa de umidade de cavacos de pinus sem casca.

5.2 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

A Tabela 6 apresenta medições de umidade de cinco diferentes amostras analisadas em campo usando o método dielétrico e pareadas aos resultados das medições em laboratório pelo método gravimétrico. São exibidos os resultados das três repetições e sua média da aplicação dos dois métodos.

TABELA 6 - RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DAS REPETIÇÕES (REP) E DA MÉDIA DE CINCO AMOSTRAS (AM) ATRAVÉS DOS MÉTODOS GRAVIMÉTRICO (GRAV) E DIELÉTRICO (DIELETRIC) PARA QUATRO TIPOS DECAVACOS

Am	pinus sem casca				pinus com casca			
	Grav		Dieletric		Grav		Dieletric	
	Rep	Média	Rep	Média	Rep	Média	Rep	Média
1	25,8		28,5		42,2		45,6	
	29,9	29	31,5	30,5	43,9	42,3	42,9	43,6
	30,8		31,6		40,7		42,3	
2	51,1		47,1		44,0		43,5	
	45,8	49	46,2	47,5	45,7	44,1	40,4	42,5
	49,3		49,3		42,5		43,6	
3	24,8		25,7		40,9		40,2	
	28,9	29	25,3	26	41,7	40,4	41,7	41
	32,1		27		38,6		41,1	
4	48,3		49,4		29,8		25,6	
	49,9	49	48,3	48,7	26,9	29,0	29,5	28,7
	47,5		48,4		30,3		30,9	
5	41,3		43,8		44,6		42,8	
	44,8	44	44	44,1	44,3	45,3	44,5	44,3
	45,2		44,5		47,0		45,7	
Am	eucalipto sem casca				eucalipto com casca			
	Grav		Dieletric		Grav		Dieletric	
	Rep	Média	Rep	Média	Rep	Média	Rep	Média
1	53,0		52,9		41,2		43	
	52,5	52,0	50,3	51,8	43,0	41,7	44,8	43,3
	50,6		52,2		40,9		42	
2	49,9		50,9		43,7		45,6	
	53,7	52,4	53,3	52,5	42,7	42,4	41,8	43,7
	53,7		53,3		40,9		43,5	
3	50,7		50,8		44,7	45,9	43,8	
	48,6	49,5	50,3	50,7	46,2		42,5	44,8
	49,1		51,2		46,7		48	
4	36,8		38,3		44,0		43,6	
	42,1	38,1	39,6	39,5	45,5	43,0	45,2	43
	35,6		40,7		39,5		40,2	
5	52,6		53		33,9		34,7	
	49,4	50,2	50,9	52	36,4	35,2	40,1	36,2
	48,5		52,2		35,1		33,9	

FONTE: O Autor

Como relatado, a validação do método dielétrico se baseou em análise de variância, que tem como premissas a independência de amostras, a igualdade de variâncias dos tratamentos e a distribuição normal dos erros entre os tratamentos.

Uma vez conhecido o método escolhido para a coleta das amostras para a leitura da umidade com o método gravimétrico e em laboratório, sabe-se que não são dependentes. A coleta das amostras nos cinco pontos da pilha de cavacos aconteceu de maneira aleatória, e cada tratamento foi aplicado em um momento diferente, ora em campo, ora em laboratório.

A premissa de igualdade de variâncias com nível de significância de 0,05 pôde ser confirmada para todos os tipos de cavacos. Para o teste de igualdade de variâncias, a hipótese nula H_0 foi a igualdade de variâncias. Tendo sido o valor P (nível de significância que se poderia estabelecer para chegar à conclusão da igualdade), maior que o nível de significância estabelecido, aceitou-se H_0 e considerou-se que as variâncias foram iguais. Somente se poderia afirmar a rejeição de H_0 ou afirmar que as variâncias são verdadeiramente diferentes com níveis de confiança muito pequenos, como mostra a Tabela 7. Além disso, todos os intervalos para desvio padrão se sobrepõem, indicando igualdade de variâncias, os quais podem ser visualizados na Figura 25.

TABELA 7 - RESULTADOS DE VALOR-P PARA TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIAS COM NÍVEL DE CONFIANÇA 95%

Tipo de cavaco	Valor P ($\geq \Omega$)	Possibilidade de rejeição de H_0
pinus sem casca	0,982	1,80%
pinus com casca	0,996	0,40%
eucalipto sem casca	0,791	20,90%
eucalipto com casca	0,897	10,30%

FONTE: O Autor

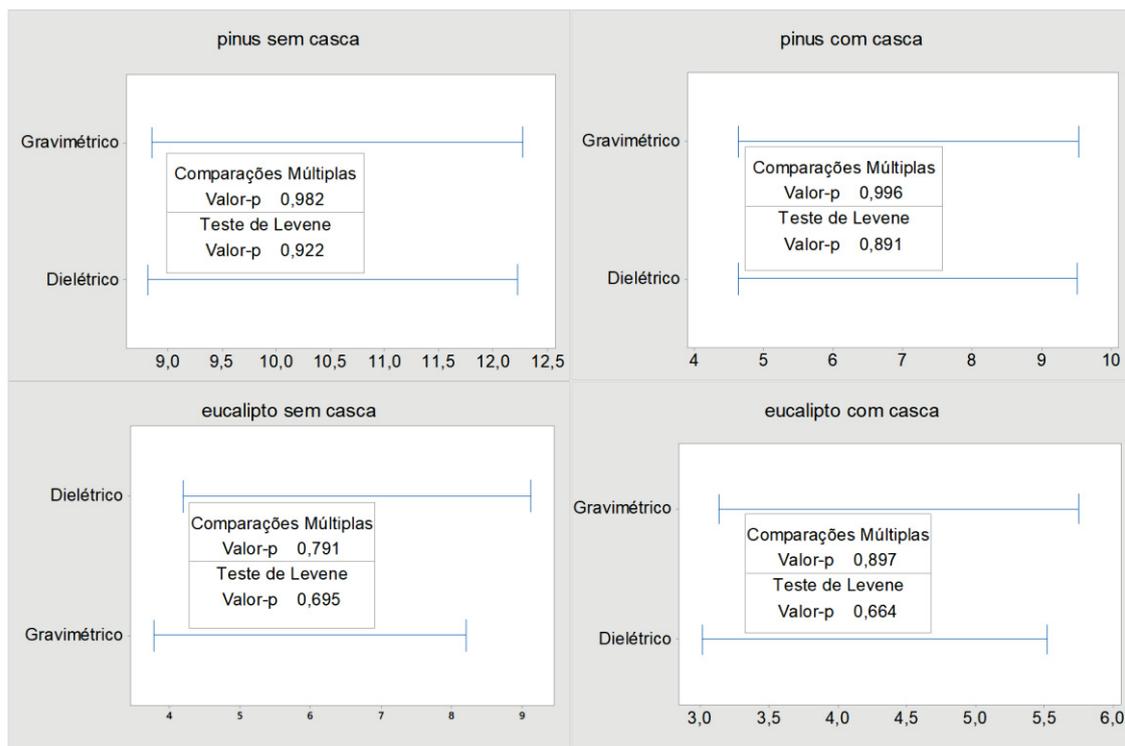


FIGURA 25 - INTERVALOS DE COMPARAÇÃO DE VARIÂNCIAS COM NÍVEL DE CONFIANÇA 95%

FONTE: O Autor

Aplicando o teste de normalidade de Anderson-Darling, cujos resultados são exibidos na Figura 26, percebe-se que, para todos os quatro tipos de cavacos, os erros entre os métodos tiveram distribuição normal.

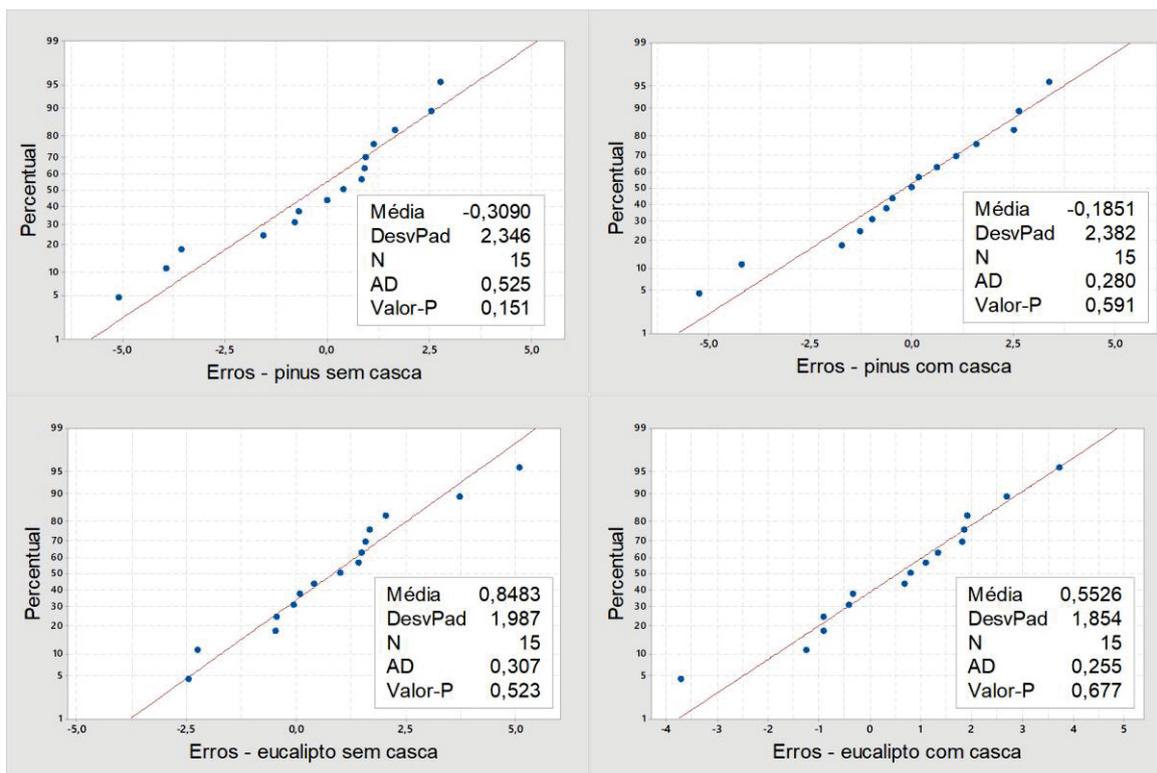


FIGURA 26 - TESTE DE NORMALIDADE PARA OS ERROS ENTRE OS MÉTODOS GRAVIMÉTRICO E DIELÉTRICO PARA QUATRO TIPOS DE CAVACOS

FONTE: O Autor

A aplicação da ANOVA de um fator seguida do teste comparativo de Tukey permitiu a análise da exatidão e da precisão do método dielétrico. Já que foram cumpridas as premissas para sua aplicação com nível de confiança de 95%, a análise foi também aplicada com nível de significância igual a 0,05.

5.2.1 Exatidão do Método Dielétrico

A Figura 27 mostra gráficos de intervalo de medição para os quatro tipos de cavacos estudados. É possível identificar, visualmente, semelhança entre resultados dos dois métodos para todos eles.

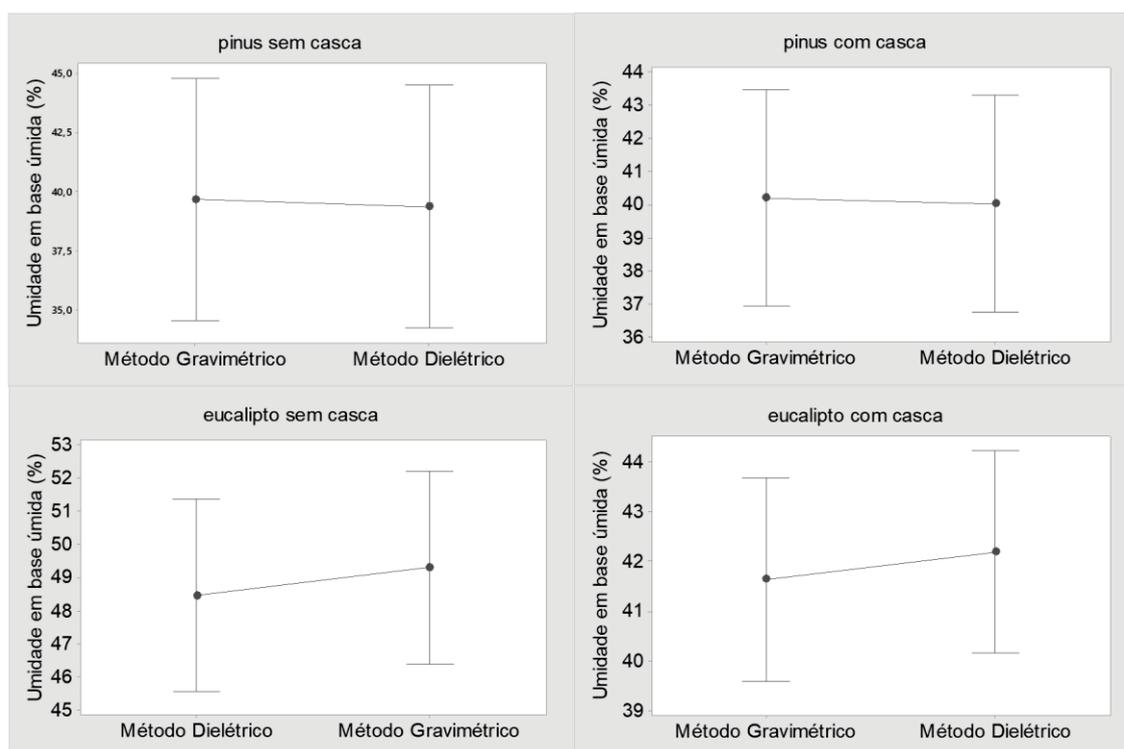


FIGURA 27 - GRÁFICOS DE INTERVALOS DE MEDIÇÕES COM OS MÉTODOS GRAVIMÉTRICO E DIELÉTRICO PARA QUATRO TIPOS DE CAVACOS

FONTE: O Autor

Na análise de variância aplicada para a validação do método dielétrico, a hipótese nula H_0 consistiu na igualdade entre as médias das medidas dos dois métodos: gravimétrico e dielétrico; ou seja, o aceite de H_0 é a validação do da exatidão do método. O aceite de H_0 acontece para Valores-P (níveis de significância que se poderia estabelecer para chegar à conclusão da igualdade) maiores que nível de significância estabelecido de 0,05. Estes valores, bem como os demais valores típicos da ANOVA foram registrados na Tabela 8.

TABELA 8 - VALORES TÍPICOS DA APLICAÇÃO DA ANOVA COMPARANDO MÉDIAS (\bar{x}) DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO E DO MÉTODO DIELÉTRICO PARA QUATRO TIPOS DE CAVACOS

Tipo de cavaco	Valor P	\bar{x} Gravimétrico (%)	\bar{x} Dielétrico (%)	Agrupamento Gravimétrico	Agrupamento Dielétrico
pinus sem casca	0,931	39,68	39,37	A _{pinus sem casca}	A _{pinus sem casca}
pinus com casca	0,935	40,21	40,02	A _{pinus com casca}	A _{pinus com casca}
eucalipto sem casca	0,675	49,29	48,45	A _{eucalipto sem casca}	A _{eucalipto sem casca}
eucalipto com casca	0,700	41,64	42,19	A _{eucalipto com casca}	A _{eucalipto com casca}

Fonte: O Autor

Na Tabela 8 observa-se indicadores que permitem concluir que as médias de umidade dos dois tratamentos, ou métodos dielétrico e capacitivo, podem ser consideradas iguais. Todos os valores-P foram maiores que o nível de significância estabelecido de 0,05, apontando para a precisão do método dielétrico. Além disso, os agrupamentos sugeridos pelo teste de Tukey foram os mesmos para os dois métodos para todos os tipos de cavacos. Hartley *et. al.* (1994), assim como James (1988), também concluíram que resultados exatos de umidade são possíveis usando o método dielétrico e o princípio capacitivo, entretanto, os autores trabalharam com madeira serrada. Enquanto os primeiros investigaram a exatidão do método para madeira sólida, o segundo estudou para cavacos. Ambos os trabalhos, todavia, limitam a precisão dos equipamentos capacitivos a 30% de umidade em base úmida, enquanto no presente trabalho a comparação entre métodos foi realizada com materiais com umidade próxima de 50%.

5.2.2 Precisão do Método Dielétrico

Para que seja aplicado de maneira funcional, é necessário que um método de medição, além de exato, seja preciso, especialmente se for utilizado

para fins de remuneração, como sugere Moreira *et. al.* (2010). Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia, (VIM) (2012), precisão é o grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas. Por mais que a análise de variância já tenha demonstrado igualdade entre as médias dos dois métodos de medição, é importante verificar também se a variância da umidade dentro dos conjuntos de dados analisado para cada método também foi semelhante. Para isto, a Tabela 9 exhibe novamente as médias das medidas de cada método para os quatro tipos de cavacos, bem como os valores de desvio-padrão dos conjuntos de valores de umidade.

TABELA 9 - MÉDIAS E DESVIOS PADRÕES DE UMIDADE MEDIDO COM OS MÉTODOS GRAVIMÉTRICO E DIELÉTRICO PARA QUATRO TIPOS DE CAVACOS

Valor típico	Pinus sem casca		Pinus com casca		Eucalipto sem casca		Eucalipto com casca	
	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad	Média	Desv Pad
Gravimétrico	39,68	9,72	40,21	6,20	48,45	5,77	41,64	3,96
Dielétrico	39,37	9,68	40,02	6,19	49,29	5,19	42,19	3,80

Fonte: O Autor

Hartmann *et. al.* (2001) também compararam resultados do método gravimétrico com resultados de métodos rápidos como o dielétrico após calibrar e ajustar os equipamentos utilizados no estudo. Em seu estudo, os autores observaram que a variância do conjunto de leituras do método dielétrico foi muito menor que a variância para método gravimétrico. Ou seja, os autores concluíram exatidão para o método dielétrico, mas baixa precisão. O mesmo não foi observado no presente trabalho, que registrou valores de desvio-padrão muito parecidos para ambos os métodos.

Além dos valores de desvio-padrão, há outros valores típicos estatísticos que podem colaborar para a análise de precisão, os quais apontam que o método dielétrico é menos preciso para a medição de umidade de cavacos de eucalipto que para cavacos de pinus. Os valores P exibidos na Tabela 09 por exemplo, foram bem menores para cavacos de eucalipto. Os níveis de certeza que

permitiriam afirmar que os tratamentos gravimétrico e dielétrico são diferentes podem ser inferidos a partir do complemento percentual dos valores P. Para os cavacos de pinus sem casca e com casca, este nível de confiança seria igual a 6,9% e 6,5%. Já para os cavacos de eucalipto, os mesmos seriam 32,5% e 30,0%.

Enquanto no presente trabalho foram observadas diferenças no comportamento dos gêneros pinus e eucalipto frente a um sensor capacitivo, Jensen *et. al.* (2006), observaram qualidade equivalente de dados coletados tanto para coníferas quanto para folhosas.

As diferenças no comportamento de cavacos de pinus e eucalipto são atribuídas, neste trabalho, ao fato de que a variação de valores de densidade em madeiras de pinus é menor que a variação desta característica em madeiras de eucalipto. Hartmann *et. al.* (2001) relatam opinião semelhante, ao observarem que grande variação de densidade influenciou nas medições realizadas pelos autores. Fuchs *et. al.* (2008), por outro lado, discordam, e concluem que a variação da densidade a granel pode ser negligenciável na obtenção de bons resultados.

5.2.3 Respostas à Pesquisa Hipotética Dedutiva

A partir dos resultados, algumas perguntas colocadas na Figura 10, adaptada de Lakatos *et. al.* (2013), que esquematiza o método de pesquisa hipotética dedutiva de forma adaptada para o presente trabalho, puderam ser respondidas:

- O método testado fornece precisão e exatidão? Sim.
- Qual é a faixa de medição? Teores de umidade de 10 a 50 % em base úmida.
- O método testado deve ser corroborado? O método dielétrico para a medição de umidade de cavacos deve ser corroborado e não rejeitado.
- Quais são as novas lacunas, contradições e problemas?

Afim de aprimorar a aplicação do método, recomenda-se a realização de pesquisas com aplicação de sensores dielétricos em fluxo de cavacos, além de amostras estáticas. Afim de viabilizar rastreabilidade metrológica para este tipo de medição, recomenda-se o registro de cálculo de incerteza para equipamentos diversos. E, afim de enriquecer o estado da arte sobre a medição de umidade de outros tipos de biomassa além de cavacos de madeira, recomenda-se a replicação da pesquisa para outros materiais como grãos, rações, bagaços e resíduos agrícolas.

Como observado na análise de regressão para a construção das funções de medição, a correlação entre capacitância e umidade foi observada para valores de umidade acima do PSF, situação que era, até então, rejeitada por James (1988).

Os principais problemas que podem ser encontrados na aplicação do método dielétrico são a dificuldade de encontrar uniformidade nos materiais a serem medidos, em termos de densidade e também o desafio da produção de sensores robustos para trabalhar em ambientes hostis como pátios de cavacos de madeira ou biomassa.

6 CONCLUSÕES

- Existe alta correlação entre a umidade de cavacos de madeira e a leitura do sensor capacitivo estudado.

- O método dielétrico, princípio capacitivo é exato, considerando o método gravimétrico como referência, para a medição de grandes faxias de umidade, incluindo acima do PSF, de cavacos de pinus e de eucalipto sem casca e com casca.

- A medição da umidade de cavacos de pinus através do método dielétrico é mais acurada se comparada à medição de umidade de cavacos de eucalipto.

- O método apresentado neste trabalho pode ser utilizado como procedimento de ajuste para a criação de funções de medição e para a avaliação do desempenho de sensores capacitivos para a medição de umidade de cavacos.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1358: Standard Test Method for Determination of Moisture Content of Particulate Wood Fuels Using a Microwave Oven. West Conshohocken, 2013.

ANAGNOSTOPOULOU-KONSTA, A. PISSIS, P. The influence of humidity on the dielectric properties of wood. In: Fifth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications; 1998. p. 105.

ANDRADE, A.de., Indicação de programas para a secagem convencional de madeiras. Dissertação (Mestrado em Ciências). – Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2000.

ANTTI, H. Multivariate characterization of wood related materials. Tese (PhD) – Departamento de Química, Universidade de Umea, Umea, Suécia, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14660: Madeira – Amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929: Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos – Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017.

AXRUP L., MARKIDES K., NILSSON T. Using miniature diode array NIR spectrometers for analysing wood chips and bark samples in motion. Journal of Chemometrics, v.14, p.561–72, 2000.

AYALEW, G., WARD, S. M. Development of a prototype infrared reflectance moisture meter for milled peat. *Computers and Electronics Agriculture*, v.28, p.1-14, 2000.

BACKA, S.; GÄFVERT, U.; CLAEISSON, B., PERSSON, U. Method and device for determining a plurality of quality variables which describe the condition of an organic matter. International patent WO 98/39639; 1998.

BALTES, H.; GÖPEL, W.; HESSE, J. *Sensors update*, vol. 7. New York: Wiley-VCH; 2000.

BEINING, B.A.; HOLDEN, N.M.; WARD, S.M.; FARELL, E.P. The prediction of some peat properties for Irish industrial bogs using near infrared spectroscopy. *Proceeding of IPC Wetland Conference*, Quebec, 2000.

BELINI, U.L.; FILHO, M.T.; CHAGAS, M.P.; DIAS, C.T. dos S. Caracterização da estrutura anatômica, densidade básica e morfologia de cavacos da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de painéis MDF. *Árvore*, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 707-713, 2008.

BERBERT, P.A.; MOLINA, M.A.B; CARLESSO, V.O.; OLIVEIRA, M.T.R. Determinação do teor de água de sementes de café empregando o método da capacitância em radiofrequências. *Revista Brasileira de Sementes*, vol. 29, nº 2, p.159-170, 2007.

BIERMANN, C.J., *Handbook of Pulping and Papermaking*. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1996. 754p.

BORGES, L.F.R.; SCOLFORO, J.R.; OLIVEIRA, A.D. et al. Inventário de fragmentos florestais nativos e propostas para seu manejo e o da paisagem. *Cerne*, v. 10, n. 1, p. 22-38, 2004.

BOTTEGA, E.L.; PEGORARO, C.; GUERRA, N.; NETO, A. de O.; de QUEIROZ, D.M. Spatial and temporal distribution of weeds in no-tillage system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande: UAEA/UFPA, v.20, n.12, p.1107-1111, 2016.

BRAND, M.A.; GIESEL, G. Influência da secagem da biomassa na eficiência de caldeira de cogeração energética. *Energia na Agricultura*, Botucatu, vol. 32, n.2, p.132-140, 2017.

BRF. Relatório Anual de Sustentabilidade 2016. BRF, 2017. Relatório técnico.

CALEGARI, L.; STANGERLIN, D.M.; SANTINI, E.J.; HASELEIN, C.R.; SOLON, J.L.; do CARMO, P.I.O.; FILHO, L.C.P. da S.; GATTO, A. Monitoramento do teor de umidade de madeiras de *Pinus elliottii* engelm. e *Eucalyptus grandis* w. hill ex maiden, sob diferentes temperaturas de secagem, através do ultra-som. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 399-408, 2007.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN1942. Acceptance tests on steam generators. Berlin, 1979.

DIAS, R.LV.; JÚNIOR, E.C.da S. A influência da densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* em suas características químicas e propriedades de polpação e do papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP. São Paulo, 1985. p.31-55.

DUARTE, M. M.; TREVISAN, R.; SUSIN, F.; ZEN, L.R. VALERIUS, J. Drying curve and defects of *Eucalyptus* sp. wooden submitted to air drying. *Spanish Journal of Rural Development*, Vol. VI (3-4 p.161-170, 2015.

DUEÑAS, R.S. Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel. 1. ed. Guadalajara: Universidad de Guadalajara, 1997. 293p.

EPE. Balanço Energético Nacional. EPE, 2015. Relatório técnico.

EPE. Balanço Energético Nacional. EPE, 2017. Relatório técnico.

FIFTH INTERNACIONAL CONFERENCE ON DIELECTRIC MATERIALS, 1998, Canterbury: Dielectric Materials, Measurements and Applications. Canterbury: IEEE, 1998.

FUCHS, A.; ZANGL, H.; BRASSEUR, G. Design and analysis of a capacitive moisture sensor for municipal solid waste. Measurement Science and Technology. Graz. n.19.9.p, 2008.

FURTADO, T. FERREIRA, J, BRAND, M. NEVES, M. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de Pinus taeda em diferentes idades. Árvore, Viçosa, v.36, n.3, p.577-582, 2012.

GALVÃO, A. P. M. Estimativas da Umidade de Equilíbrio da Madeira em Diferentes Cidades do Brasil. IPEF, n.11, p.53-65, 1975.

GLASS, S.V.; ZELINKA, A.L. 2010. Moisture relations and physical properties of wood. General Technical Report FPL- GTR. 190: 20 p.

GOLDEMBERG, J.; USP. Energia, meio ambiente & desenvolvimento. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1998. 125 p.

GOLDSTEIN, I. S. Wood technology: chemical aspects. Washington, 1977.

GOLTZ, E.P. Calibração de medidor portátil de umidade de cavacos e materiais granulados. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira). – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2014.

GOVETT, R.; MACE, T. BOWE, S. A practical guide for the determination of moisture content of woody biomass. Department of Natural Resources. Disponível em: <https://dnr.wi.gov/topic/ForestBusinesses/documents/BiomassMoistureContent.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2018.

GRACE, T. M.; MALCOLM, E.W. Pulp and paper manufacture. 16. ed. Montreal: Canadian Pulp and Paper Association, 1989. p. 6-14.

HALLIDAY D.; RESNICK R.; WALKER J. Fundamentos de Física: elétrica. Volume 1. 8ª edição. Editora LTC, 2012.

HARTLEY, I.D. Characterization of water in wood below the fibre saturation point. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – British Columbia University, Canada, 1994.

HARTMANN, H. BÖHM, T. Rapid moisture content determination of wood chips – results from comparative trials. In: 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, p.571-574, 2001.

HAUKSSON, J. B., BERGQUIST, G., BERGSTEN, U., SJÖSTRÖM, M., EDLUND U. Prediction of basic wood properties for Norway spruce. Interpretation of near infrared spectroscopy data using partial least squares regression. Wood Science Technology, v.35, p.475–85, 2001.

HOLLINGER, R.D.; JOSE, K.A.; TELLAKULA, A.; VARADAN, V.V.; VARADAN, V.K. Microwave characterization of dielectric materials from 8 to 110 GHz using a free-space setup. *Microwave Opt Technol Lett* 2000.

IMGRUM. @klabin_. Curitiba, 2017. Acesso em: 12 jan. 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ (2017). Anuário estatístico da IBÁ 2017: ano base 2016. Brasília: IBÁ, 2017. 80 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. VIM 2012: Vocabulário Internacional de Metrologia. Rio de Janeiro, 2012.

INTERNATIONAL WETLAND CONFERENCE, 2000, Quebec: The prediction of some peat properties for Irish industrial bogs using near infrared spectroscopy. Quebec: IPC, 2000.

ISO GUM (2008), Avaliação de dados de Medição - Guia para a expressão de incerteza de medição, 1ª edição brasileira.

JAMES, W.L. Dielectric properties of wood and hardboard: variation with temperature, frequency moisture content, and grain orientation. Madison, WI: US Department of Agriculture; 1974.

JAMES, W. L. Electric moisture meters for wood. Madison: Forest Products Laboratory, 1988.

JAMES, W.L. Electricmoisture meters for wood. USDA Forest Service, General Technical Report FPL-6. US DepartmentofAgricultural, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, 1975.

JAMES, W.L.; YEN, Y.H.; KING, R.J. A microwave method for measuring moisture content, density and grain angle of wood. US Department of Agric. Forest Service; 1985.

JANKOWSKY, I.P.; SANTOS, G.R.V.; ANDRADE, A. secagem da madeira serrada de Eucalyptus. In: JORNADA FORESTALES DE ENTRE RIOS, Concórdia, 2000. p.109-125.

JBS. Relatório Anual de Sustentabilidade 2017 – JBS. JBS, 2018. Relatório técnico.

JENSEN, P.D.; HARTMANN, H.; BOHM, T.; TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; MORSING, M. Moisture content determination in solid biofuels by dielectric and NIR reflection methods. Biomass and Bioenergy, v.30, p. 935–943, 2006.

JOHANSSON, J. Property predictions of wood using microwaves. Licentiate thesis. Sweden: Department of Chemistry, Umea University; 2001.

JUIZO, C.G.F.; LIMA, M.R.; SILVA, D.A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife, v.12, n.3, p.386-390, 2017

JÚNIOR. S.V.; SOARES. I.P. Análise química da biomassa – uma revisão das técnicas e aplicações. Quim. Nova, vol. 37, No. 4, 709-715, 2014.

KLABIN. Relatório de Sustentabilidade da Klabin 2015. Klabin, 2016. Relatório técnico.

KOCUREK, M.J. Mill control and control systems: quality and testing, environmental corrosion, electrical. 3. ed. 9. vol. Atlanta: TAPPI, 1992. 430p.

KOLLMANN, F. E. P.; CÔTE JUNIOR, W. A. Principles of wood science and technology. New York: Springer-Verlag, 1968. 592p.

LABOSKY Jr., P.; YOBP, R. D.; JANOWIAK, J. J.; BLANKENHORN, P. R. Effect of steam pressure refining and resin levels on the properties of UF-bonded red maple MDF. Forest Products Journal, v.43, n.11/12, p.82-88, 1993.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M. de A. Fundamentos de metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Atlas 2003.

LELLES, J. G. de; SILVA, J. de C. Novos usos para a madeira. Revista da Madeira, Curitiba, v. 6, n. 36, p. 42-45, 1998.

LIMA, E. A.; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira. Colombo: Embrapa Florestas, Embrapa Florestas, n. 220, 2008.

MALONEY, T. M. Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing. San Francisco: Miller Freeman, 1989.

MATTOS, R.L.G.; GONÇALVES, R.M.; DE CHADAS, F. B. Painéis de madeira no brasil: panorama e perspectivas. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2008. p. 121-156.

MCKENDRY P.M. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. Biosource Technology, v. 83, n. p. 37–46, 2001.

METSO PAPER. Woodhandling – VisiChips. Disponível em: [http://www.metsopaper.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-040630-2256E5323C/\\$File/MPP_R_0065-02.pdf?openElement](http://www.metsopaper.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-040630-2256E5323C/$File/MPP_R_0065-02.pdf?openElement). Acesso em: jul. 2018.

MOREIRA, J. M. M. A. P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. PFB, Colombo, v.31, n.68, p.363-372, abr./jun; 2011.

MOREIRA, J.M.M.A.P.; LIMA, E.A.; GOULART, I.C.G.dos R. Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha. Colombo: Embrapa Florestas, n. 293, 2010.

MORESCHI, J.C. Propriedades da Madeira. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasmoreschi/PROPRIEDADES%20DA%20MADEIRA.pdf>. Acesso em 27 jul. 2018.

ISO GUM (2008), Avaliação de dados de Medição - Guia para a expressão de incerteza de medição, 1ª edição brasileira.

MUÑIS, G. I. B. Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 1993.

NELSON, S.O.; KRASZEWSKI, A.W.; TRABELSI, S.; LAWRENCE, K.C. Using cereal grain permittivity for sensing moisture content. *IEEE Trans Instrum Meas* 2000.

NIGOSKI, S. Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L. Curitiba. 2005. 160p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

NORDELL, A., VIKTERLOF, K. J. Measurements of moisture content in wood fuels with dual energy X-ray. *Värmeforsk*, Estocolmo, 2000.

NYFORS, E. Subsurface Sensing Technologies and Applications. *Sensing and Imaging*, Helsinki, v.1, n.1, 24.p., 2000.

NYSTRÖM, J. AXRUP, L., DAHLQUIST, E. Long term evaluation of online sensors for determination of moisture in biomass. *Varmeforsk Project publication series*, Estocolmo, p. A9-819, 2002.

NYSTRÖM, J. DAHLQUIST, E. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants - a review. *Fuel*, Västerås, v.83, p. 773-779, 2004.

OKAMURA, S; ZHANG, Y. New method for moisture content measurement using phase shifts at two microwave frequencies. *J Microwave Power Electromagn Energy* 2000.

OLIVEIRA, J. T. S., CARVALHO, A. M. L. Secagem e Preservação da Madeira de Eucalipto. Revista da Madeira, n. 55, p. 58-61, 2001.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. *Árvore*. Viçosa, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

PAZ, A.M. The dielectric properties of solid biofuels. Tese (Doutorado em Sustainable Development of Society and Technology). - Mälardalen University, Västerås, Suécia, 2010.

POPPER, K. S. A lógica da pesquisa científica. São Paulo: Cultrix, 1975.

REHNBERG, H. Moisture measurement on woodchips and other solid biofuels. *Värmeforsk* 2001.

RIBEIRO, A. Instrumentação. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 1999.

RIBEIRO, F. A., FILHO, J. Z. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. IPEF, Monte Alegre, n. 46, p.75-85, 1993.

RINDBORG, M. Millsys Västerås. No prole.

ROSENBERG, E.; SCHATVET, J.; HØYDAL, K. In-kiln measurements of moisture content in timber at Moelven Va°ler AS. Third European COST E15 Workshop on wood drying: softwood drying to specific end-uses, Helsinki, Finland; 2001. p.1–9.

SIAU, J.F. Flow in wood. Syracuse: Syracuse University Press, 1971, 131p.

SILVA, J. de S.; RUFATO, S. Determinação da Umidade do Café. In: SILVA, J. de S.; RUFATO, S. Secagem e Armazenagem do Café – Tecnologias e Custos. Viçosa: JARD Editora Ltda, 2001. p.133-148.

SKAAR, C. Water in wood, Syracuse, Syracuse University Press, 1972. 318p.

SOARES, T.S.; do VALE, A.B.; LEITE, H.G.; MACHADO, C.C. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. *Árvore*, Viçosa, v.27, n.6, p. 811-820, 2003.

STCP. Oportunidades para florestas energéticas na geração de energia no Brasil. INPUT, 2015. Relatório técnico.

SWEDISH STANDARDS INSTITUTION. SS187170. Biofuels and peat – determination of total moisture. Estocolmo, 1997.

TIURI, M.; TOIKKA, M. Radio wave probe for in situ water content measurement of peat. *Sou* 33 1982.

TORGOVNICOV, G. L. Dielectric properties of wood and wood-based materials. Berlin: Springer, 1993.

TOROPAINEN, A. Set-up for measuring changes in the average size of wooden chips by microwave scattering. European Microwave Conference, Cannes; 1994. p. 1203.

TSUTSUMI, J.; WATENABE, H. Studies on dielectric behaviour of wood. Jpn Wood Res Soc 1965.

ULABY, F. Fundamentals of applied Electromagnetics. Pearson Prentice Hall, 5 edition, 2007.

VALE, R. S. et al. Efeito da desrama artificial na qualidade da madeira de clones de eucalipto em sistema agrossilvipastoril. Revista Árvore, v.26, n.3, p.285-297, 2002.

VERACEL. Relatório de Sustentabilidade 2016. Veracel, 2017. Relatório técnico.

VIDAL, A.C.F.; da HORA, A.B. Painéis de madeira no brasil: panorama e perspectivas. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2017. p. 261-314.

VINGE, J. J. O perfil do profissional de nível superior de metrologia face aos sistemas de gestão. 201 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, 2004.

WALLANCE, M.; FAITH III, D.C.; COOPER, S.L. Dielectric spectroscopy at subaudio frequencies-two techniques in comparison (thermoplastic elastomer permittivity spectra). Rev Sci Instrum 1980.

WEBER, C.J. Estudo sobre viabilidade de uso de resíduos de compensados, mdf e mdp para produção de painéis aglomerados. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) –Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2011.

WESTER, L. Förbrännings- och rökgasreningsteknik Inst. för samhällsteknik, Mälardalens högskola, Kompendium, 2001.

WIECHETECK, M. Apoio às Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle Ambiental - Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos. Curitiba: nov. 2009. (Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental e Secretaria de Biodiversidade e Florestas – Projeto PNUD BRA 00/20). Projeto concluído.

WILEY, A.T., CHOONG, E.T. An analysis of free water flow during drying softwoods. Wood Science, Madison, v.7, n.4, p.310-318, 1975.

ZANUNCIO, A.J.V., CARVALHO, A.G., DAMÁSIO, R.A.P., de OLIVEIRA, B.da S., CARNEIRO, A.de C.O., COLODETTE, J.L. Relationship between the anatomy and drying in *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* wood. *Árvore* [online]. 2016, vol.40, n.4, pp.723-729.

ZEN, L.R. Métodos combinados para secagem da madeira de eucalyptus: présecagem ao ar livre com secagem em estufa convencional. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2016.