

UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA SECAGEM POR MICRO-ONDAS  
DE ESPÉCIES MADEIREIRAS AMAZÔNICAS

Anízio de Araújo Cavalcante

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientadores: Samuel Jurkiewicz

Ricardo Manfredi Naveiro

Basílio de Bragança Pereira

Rio de Janeiro  
Novembro de 2013

UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA SECAGEM POR MICRO-ONDAS  
DE ESPÉCIES MADEIREIRAS AMAZÔNICAS

Anízio de Araújo Cavalcante

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Examinada por:

---

Prof. Samuel Jurkiewicz, D.Sc.

---

Prof. Ricardo Manfredi Naveiro, D.Sc.

---

Prof. Basílio de Bragança Pereira, Ph.D.

---

Prof. Francisco José de Castro Moura Duarte, D.Sc.

---

Prof. Reinaldo Castro Souza, D.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Graciela Inês Bolzon de Muniz, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2013

Cavalcante, Anízio de Araújo

Uma Proposta de Metodologia para Secagem por Micro-ondas de Espécies Madeireiras Amazônicas / Anízio de Araújo Cavalcante. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XIV, 109 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Samuel Jurkiewicz

Ricardo Manfredi Naveiro

Basílio de Bragança Pereira

Tese (doutorado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia de Produção, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 94-104.

1. Secagem Micro-ondas. 2. Madeira. 3. Superfície de Resposta. I. Jurkiewicz, Samuel *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

Aos meus pais

Mário e Helena (in memoriam) a quem devo amor e dedicação pela determinação com que conduziram minha formação espiritual e profissional.

Aos meus irmãos

Clarice (in memoriam) e Olinto

ofereço.

“Pela inspiração espiritual que induz ao trabalho permanente, a despeito de todos os riscos, sacrifícios e insucessos, na esperança de um mundo melhor”.

**MARIA, MÃE DE DEUS.**

À minha esposa “ROSINEILI”  
pelo amor, amizade e compreensão.

Aos meus filhos e seus cônjuges

Anízio Júnior (Nilcely), Sílvia Helena (Lynaldo), Mário Gadelha  
(Lucylene) e Ana Clarissa,

Aos meus netos

Michael Cavalcante, Lívia Clarice e Lynaldo Filho,

por um mundo melhor no futuro,

dedico

## A G R A D E C I M E N T O S

O autor agradece a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho, e em particular:

Aos Profs. Dr. Ricardo Manfredi Naveiro, Dr. Samuel Jurkiewicz e Dr. Basílio de Bragança Pereira, pela orientação, estímulo, amizade, companheirismo e paciência;

Aos docentes do DINTER em Engenharia de Produção da UFRJ/COPPE, pelo incentivo, em especial aos Prof. Dr. Francisco José de Castro Moura Duarte e Prof. Dr. Roberto dos Santos Bartholo Junior.

Ao Dr. Estevão Vicente Cavalcante Monteiro de Paula, Dra. Claudete Catanhede do Nascimento, Dr. Roland Ernst Vetter, Dra. Suely de Souza Costa, MSc. Marta Martins Brasil, MSc. Roberto Daniel de Araújo e ao Técnico Jair Ferreira Batista, do INPA, pelo apoio na execução do trabalho.

Ao Prof. Dr. José Cardoso Neto e sua aluna de mestrado Gleici Jane Sena Cruz da Universidade Federal do Amazonas - UFAM pela análise estatística dos dados desta pesquisa.

A IPA - Madeiras . pela concessão do material utilizado no desenvolvimento do trabalho, em especial ao Eng<sup>o</sup> Florestal Adamir Nina Júnior.

Aos amigos e companheiros de trabalho no CESIT, Prof. MSc. Antônio Cauper Filho, Prof. Dr. Luis Antônio de Araújo Pinto, Prof. MSc. Antenor Ferreira Filho, etc.

Aos amigos do curso de Pós – Graduação, Prof. MSc. José Brandão de Moura , Prof. MSc. Mário Augusto Bessa, e demais colegas pelo estímulo e amizade durante o curso.

Às pessoas que colaboraram para a realização deste trabalho e tiveram seus nomes aqui omitidos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA SECAGEM POR MICRO-ONDAS DE ESPÉCIES MADEIREIRAS AMAZÔNICAS

Anízio de Araújo Cavalcante

Novembro/ 2013

Orientadores: Samuel Jurkiewicz

Ricardo Manfredi Naveiro

Basílio de Bragança Pereira

Programa: Engenharia de Produção

A pesquisa visou à determinação de uma metodologia para a indicação do programa de secagem para a madeira Louro - preto. A pesquisa foi desenvolvida em duas etapas. Na etapa de teste foi realizada uma secagem com papel termossensível, para determinar, se o aquecimento excessivo causaria efeito desfavorável, uma possível queima durante a secagem da madeira. A secagem teste da madeira de Louro - preto mostrou média tendência a formação de racha de superfície e moderadamente pequena a racha de topo. Testes de secagem foram realizadas em condições diferentes de temperatura inicial (40 °C, 45 °C e 50 °C), umidade relativa inicial (70%, 80% e 90%) e umidade relativa final (45%, 55% e 65%). Para análise estatística foi elaborado um planejamento experimental fatorial  $3^3$ , utilizando o programa estatístico R, versão 2.14.0 e pacote MSR (Metodologia de Superfície de Resposta). A ANOVA realizada mostrou evidência da falta de ajuste ( $p$ -valor  $< 0,0001$ ). Apesar disso, foi realizada a construção dos gráficos 3D da Superfície de Resposta. As análises realizadas com a utilização dos testes de Kruskal - Wallis e de Fisher mostraram diferenças significativas entre as médias das variáveis analisadas, menor proporção de defeitos e umidade final próxima de 10%, a madeira Louro - preto deve ser seca com temperatura inicial de 45°C, umidade relativa inicial de 90% e umidade relativa final de 65%. A ferramenta estatística box-plot foi utilizada para embasar a decisão a ser tomada, onde é verificado que as temperaturas de 45 °C, umidade relativa inicial de 90% e umidades relativas finais de 55% e 65% mostraram-se mais próximas da umidade final de madeira. O teste de validação comprovou que as variáveis de 45-90-65, determinadas na pesquisa foram adequadas para a secagem da madeira de Louro - preto.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

METHODOLOGY PROPOSED FOR DEFINING THE MICROWAVE DRYING  
BEHAVIOR OF AMAZONIAN SPECIES.

Anízio de Araújo Cavalcante

November/ 2013

Advisors: Samuel Jurkiewicz

Ricardo Manfredi Naveiro

Basílio de Bragança Pereira

Department: Production Engineering

The research aimed to determine a methodology for displaying the drying program for wood Louro - Preto. The research was conducted in two stages. In step for drying test was performed with thermosensitive paper in order to determine if the overheating would cause adverse effect, one can burn during the drying of the wood. Drying test timber Louro - Preto showed average tendency to formation of surface cracks and a moderately small splits top. Drying tests were performed at different initial temperature (40 °C, 45 °C and 50 °C), initial relative humidity (70%, 80% and 90%) and relative humidity final (45%, 55% and 65%). For statistical analysis, we designed a 33 factorial experimental design using the statistical program R, version 2.14.0 package and MSR (Response Surface Methodology). The ANOVA performed showed evidence of lack of fit (p-value <0.0001). Although the construction was carried out 3D graphics of Response Surface. The analysis carried out using the Kruskal - Wallis and Fisher's test showed significant differences between the means of the variables and the lowest proportion of defects and final moisture content of approximately 10%, the Louro - preto wood must be dry with initial temperature of 45oC, relative humidity 90% initial and final relative humidity 65%. The box-plot statistical tool was used to support the decision to be taken, where it is found that the temperatures of 45 °C, relative humidity 65% initial and final relative humidities of 55% and 65% showed the closest final moisture content of wood. The validation test has shown that certain 45-90-65 variables in the study were appropriate for the drying of Louro - preto wood.

## SUMÁRIO

	LISTA DE FIGURAS	
	LISTA DE TABELAS	
	RESUMO	
	ABSTRACT	
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVOS	3
	Objetivo Geral	3
	Objetivos Específicos	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DESTA PESQUISA	3
2	REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1	ESTRUTURA DA MADEIRA EM RELAÇÃO À SECAGEM	5
2.2	CINÉTICA DE SECAGEM	7
3	MÉTODOS DE SECAGEM DA MADEIRA	10
3.1	SECAGEM NATURAL	11
3.2	SECAGEM SOLAR	12
3.3	SECAGEM CONVENCIONAL	13
3.4	SECAGEM POR DESUMIDIFICAÇÃO	14
3.5	SECAGEM POR AQUECIMENTO DO AR	15
3.6	SECAGEM POR TRANSIÇÃO VÍTREA	16
3.7	SECAGEM POR MICRO-ONDAS	16
	Aspectos Gerais da Secagem	16
	Densidade e Profundidade de Penetração de Micro-ondas	20
	Massa da Amostra	22
	Influência do Teor de Umidade Inicial	22
	Temperatura	24
4	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	26
	Método de Superfície de Resposta - MSR	29
	Discretização	31
	Análise de Sensibilidade	33
	Análise de Experimentos Fatoriais Fracionários	34
4.1	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	35

4.2	METODOLOGIA DA PESQUISA	36
	A Espécie Florestal	37
	Sistema de Secagem	37
	Fluxograma de Secagem	39
4.3	PROGRAMAS DE SECAGEM CONVENCIONAL	43
	Aquecimento	44
	Secagem propriamente dita	44
	Equalização (Uniformização) e Condicionamento	45
5	ETAPA DE TESTE	46
	Introdução	46
	Metodologia	46
	Resultados e Discussão	47
	Conclusões da Etapa de Teste	53
6	ETAPA DO EXPERIMENTO	54
6.1	ANÁLISE DESCRITIVA	54
6.2	METODO DE SUPERFICIE DE RESPOSTA	56
6.3	COMPARAÇÕES PELA ANALISE DE TESTES NÃO PARAMETRICOS	59
	Teste de Kruskal – Wallis	60
	Teste de Fisher	66
6.4	ANALISE DO BOX-PLOT	71
6.5	ANALISE DE VELOCIDADE DE SECAGEM	75
6.6	ANALISE DE ENERGIA ELETRICA	79
6.7	DEFEITOS DECORRENTES DO PROCESSO DE SECAGEM	83
	Empenamento do tipo Encanoamento	84
	Rachadura de Topo	85
	Rachadura de Superfície	85
6.8	COMPARAÇÃO ENTRE SECAGENS	86
6.9	VALIDAÇÃO DO MODELO	87
7	CONCLUSÕES	90
7.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	94
	ANEXOS	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Modelo geral do movimento de água numa folhosa. O tamanho das flechas indica a importância do fluxo.	6
Figura 2.	Diagrama esquemático do modelo de 2-poro de secagem.	8
Figura 3.	Curva típica de secagem.	8
Figura 4.	Empilhamento da madeira para uma secagem natural ou ao ar livre.	11
Figura 5.	Estrutura do secador solar do INPA	12
Figura 6.	Câmara de secagem de madeiras por queima de resíduo.	15
Figura 7.	Onda monocromática eletromagnética polarizada no plano y-z.	17
Figura 8.	Indução do campo eletromagnético nas moléculas da água.	18
Figura 9.	A dependência de $\epsilon_r''$ (eff) sobre o teor de umidade.	24
Figura 10.	Forno de micro-ondas Easydry utilizado no experimento.	38
Figura 11.	Fluxograma de secagem por micro-ondas.	39
Figura 12.	Esquema demonstrativo da medição do colapso.	43
Figura 13.	Distribuição de campo na câmara de secagem por micro-ondas.	47
Figura 14.	Distribuição de campo após ajuste do terceiro magnéton em 10% (90% de potência).	48
Figura 15.	Método de Superfície de Resposta da madeira Louro preto: a) Umidade Final da Madeira em relação a TI(°C) e URF(%), fixado URI de 80%; b) Umidade Final da Madeira em relação a TI(°C) e URI(%), fixado URF de 55%, e c) Umidade Final da Madeira em relação a URI(%) e URF(%) fixado TI de 45 °C.	58
Figura 16.	Análises Box-plot da secagem por micro-ondas da madeira Louro-preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013). a) Umidade Final da Madeira para cada Temperatura Inicial; b) Umidade Final da Madeira para cada Umidade Relativa Inicial e c) Umidade Final da Madeira para cada Umidade Relativa Final.	72
Figura 17.	Análises Box-plot da secagem por micro-ondas da madeira Louro-preto dado a presença de defeitos ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013). a) Umidade Final da Madeira em relação a Temperatura Inicial; b) Umidade Final da Madeira em relação a Umidade Relativa Inicial, e c) Umidade Final da Madeira em relação a Umidade Relativa Final.	74

Figura 18. Defeito do tipo racha de superfície

86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Critério utilizado na classificação de tendência do aparecimento de defeitos (rachas, empenos, colapso e endurecimento superficial).	40
Tabela 2.	Critério utilizado para classificar o tempo de secagem por micro-ondas, para tábuas de 2,5 cm de espessura.	40
Tabela 3.	Critérios utilizados na classificação dos defeitos oriundos da secagem.	42
Tabela 4.	Resultado da distribuição da umidade em função da localização no forno.	48
Tabela 5.	Parâmetros do Resultado da secagem por microonda da madeira de Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	49
Tabela 6.	Valores da umidade inicial e final e escores dos defeitos da madeira de Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	51
Tabela 7.	Avaliação dos defeitos de secagem por micro-ondas para a madeira Louro-preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	52
Tabela 8.	Valores médios da Umidade inicial, Umidade final e Tempo de secagem por Micro-ondas do Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	54
Tabela 9.	Resultados de Umidade inicial e final, secagem e defeitos para os programas de secagens por micro-ondas utilizados para a madeira de Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	55
Tabela 10.	Resultados da ANOVA para o modelo dos dados.	57
Tabela 11.	Teste de Kruskal-Wallis para a Temperatura inicial da madeira de Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	60
Tabela 12.	Teste de Kruskal-Wallis para a Umidade Relativa inicial da madeira de Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	61
Tabela 13.	Teste de Kruskal-Wallis para a Umidade Relativa final da madeira de Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	62
Tabela 14.	UFM média e desvio padrão em cada programa TI-URI-URF	64
Tabela 15.	Proporção de defeito em cada Programa TI-URI-URF.	65
Tabela 16.	Teste de Fisher dos Defeitos para as 3 (três) variáveis da madeira de Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	67
Tabela 17.	Teste de Fisher do Defeito Empenamento para as 3 (três) variáveis	68

	da madeira de Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	
Tabela 18.	Teste de Fisher do Defeito Rachadura de Topo para as 3 (três) variáveis da madeira de Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	69
Tabela 19.	Teste de Fisher do Defeito Rachadura de Superfície para as 3 (três) variáveis da madeira de Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013).	70
Tabela 20.	Velocidade média de secagem.	77
Tabela 21.	Custo real e previsão das secagens do Louro - preto ( <i>Nectandra cuspidata</i> , Manaus, 2013) para 0,0342 m <sup>3</sup> .	81
Tabela 22.	Comparativo entre as secagens mais utilizadas e a secagem por micro-ondas	87
Tabela 23.	Valores da secagem por micro-ondas do Louro - preto observadas no processo de validação para 0,0342 m <sup>3</sup> .	88

# 1 INTRODUÇÃO

A secagem de madeiras, uma das mais antigas técnicas de preservação, foi utilizada pelo homem para aumentar a vida útil da madeira em uso. Existem vários processos de secagem da madeira e hoje os mais conhecidos e utilizados são o natural e o convencional. A secagem natural tem desvantagens de ser dependente das condições climáticas, além de ser demorada. Por outro lado, os secadores convencionais, que são estufas acima de 20 m<sup>3</sup>, secam mais rápido, porém são proibitivos para as pequenas e micro e provavelmente para as médias empresas também, em função do seu alto valor aquisitivo.

A secagem deve ser encarada como a principal atividade no setor madeireiro, uma vez que o produto deve estar com a umidade final em condições de uso. A secagem desenvolvida na região norte pode ser considerada precária, pois o processo quando é utilizado, é a secagem natural, que é demorada e seca somente até a umidade de equilíbrio da região (18%). Em função dessa prática de secagem não ser tão rigorosa quanto à qualidade final, podem existir problemas de defeitos desde o corte inicial da madeira até a confecção de móveis e artefatos de madeira. É importante sensibilizar não só os técnicos que trabalham com madeira, como a comunidade em geral, para que entendam a importância de se trabalhar e ter madeira com umidade adequada no local de sua utilização, pois a principal finalidade é implementar uma consciência em relação à utilização e benefícios do uso da madeira seca.

Porém, existe uma nova perspectiva para melhorar a secagem de madeiras amazônicas, que é a secagem por micro-ondas, pois nesta “nova técnica”, o tempo necessário para secar madeiras de coníferas e algumas folhosas europeias não ultrapassa 24 horas. Em termos de Brasil, não existem pesquisas na secagem por micro-ondas, por isso, é necessário um Programa de Secagem voltado para a utilização de madeiras nacionais, principalmente amazônicas. Este processo permite obter madeira dimensionalmente estável, seca e em condições de uso imediato, com menor gasto de energia possível.

As constantes causas pela busca de maior eficácia no processo de secagem estão relacionadas com a principal motivação do autor. Pois o mesmo é Engenheiro Op. da Indústria da Madeira exercendo a função de Professor da

Universidade do Estado do Amazonas - UEA, ministrando disciplinas de Tecnologia da Madeira, incluindo aí a Secagem de Madeiras. Além disso, esta pesquisa apresenta um aspecto que é oriundo da experiência do autor em processos de secagem convencional, que é a determinação do Programa de Secagem para madeiras amazônicas. Nesta pesquisa, problemas encontrados estão relacionados com a determinação da temperatura inicial na secagem de madeiras por micro-ondas, e com um agravante, é um processo novo para as indústrias madeireiras do norte, e provavelmente do Brasil.

Além dessas razões pela busca mais eficiente no processo de secagem, existe a probabilidade do gasto energético ser compensado com a produção de madeira seca em pouco tempo, ou seja redução no tempo de secagem com qualidade final adequada. Na presente pesquisa, talvez a energia elétrica utilizada no processo de secagem tenha um menor custo, considerando que a secagem deva ser rápida.

A pesquisa desenvolvida no Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia - INPA foi realizada em duas etapas: etapa de teste e etapa do experimento. Antes das duas etapas foram explicados os procedimentos para a realização da análise. Na etapa de teste foi realizada uma secagem por micro-ondas com o intuito de saber qual comportamento que a madeira de Louro - preto teria durante o processo e qual a qualidade após secagem.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A ausência de uma política adequada ao setor madeireira combinado aos altos investimentos necessários à aquisição de equipamentos de secagem, é facilmente comprovada quando se verifica que a indústria moveleira é em geral, uma empresa pequena e até mesmo de micro porte, de caráter familiar, na sua grande maioria com baixa envergadura econômica (VALVERDE, 2000). Essas indústrias moveleiras são na realidade pequenas e micro marcenarias, instaladas em galpões ou até mesmo no quintal de sua residência. E o problema comum encontrado em todas as marcenarias diz respeito à secagem de madeiras. Em empresas que trabalham com madeira maciça, a falta de um processo de secagem é um problema crítico.

Em função da precária condição financeira de algumas empresas do ramo madeireiro – moveleiro, a solução deve ser a união de todas com o intuito de fortalecer a imagem e o fator tecnológico das micro, pequenas e médias empresas e ainda mais,

competir no mercado de produtos de madeira projetados e por encomenda. E, como forma de produzir com qualidade, esse consorcio deve secar madeira. A secagem da madeira é um fator primordial para quem trabalha com produtos de madeira, pois além de eliminar a umidade contida na madeira, torna-a menos suscetível a ocorrência de defeitos.

Em função disso, o presente estudo terá como objetivo a utilização do sistema de secagem por micro-ondas utilizando madeira amazônica. Diante disso, existe a possibilidade na melhoria da qualidade na produção final, com a redução de perdas por defeitos comuns que ocorrem na secagem convencional. Além disso, o equipamento pode ser utilizado dentro de uma movelaria para um processo de secagem por micro-ondas.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **Objetivo Geral**

Criar uma metodologia com a finalidade de “Determinar o *Programa de Secagem* mais eficiente para uma determinada espécie amazônica”.

### **Objetivos Específicos**

- ❖ Registrar o consumo específico de energia;
- ❖ Registrar o tempo de secagem
- ❖ Investigar as distribuições de temperatura e umidade durante a secagem de micro-ondas de madeira.

## **1.3 ORGANIZAÇÃO DESTA PESQUISA**

A pesquisa está estruturada em 7 capítulos, conforme explicado a seguir.

Capítulo 1. Introdução, Justificativa e Objetivos – aborda o tema a ser pesquisado e apresenta o trabalho como um todo, justificando a presente pesquisa do por quê da sua utilização, além de apresentar os objetivos, tanto o geral quanto os específicos;

Capítulo 2. Revisão de Literatura – foi realizada com o propósito de apresentar as características da matéria-prima, fornecendo informações sobre as espécies tropicais. Além disso, é mostrada a estrutura da madeira em relação ao processo e cinética da secagem.

Capítulo 3. Métodos de Secagem da Madeira - nesta etapa serão apresentados os métodos de secagem mais utilizados pela indústria madeireira. Em cada método discutido será mostrado os procedimentos inerentes a cada um. A seguir será realizada uma apresentação do princípio e aspectos da secagem por micro-ondas, objeto desta pesquisa.

Capítulo 4. Planejamento do Experimento – a metodologia utilizada seguiu as etapas sugeridas para a análise, entendimento e aplicação do processo de secagem por micro-ondas, buscando investigar as inferências válidas e ajuste dos dados. De modo prático, será determinada a pergunta de pesquisa, os objetivos da mesma, além de dar as razões para a hipótese de pesquisa e do método estatístico a ser aplicado.

Capítulo 5. Etapa de Teste - nesta etapa será apresentada a concepção da estratégia, o entendimento do modelo secagem por micro-ondas, e a pré - secagem da madeira a ser estudada.

Capítulo 6. Etapa do Experimento / Análise dos Dados – nesta fase, a análise da secagem de uma espécie de folhosa e a validação dos programas de secagem serão estudados. Também será realizada a pesquisa qualitativa dos dados através da análise estatística, revelando a pergunta da pesquisa a partir das principais estratégias verificadas. Além de mostrar os possíveis defeitos de uma secagem e os passos a serem adotados em um Programa de Secagem.

Capítulo 7. Conclusões e Considerações Finais – serão apresentados os resultados a partir da metodologia proposta, assim como indicações de trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

A utilização da energia eletromagnética em processos de aquecimento e secagem por micro-ondas tem evidenciado ser muito essencial na engenharia química, na engenharia de alimentos, na medicina, no meio ambiente, na engenharia florestal, entre outras. Em meio as utilizações tem-se a desidratação e o aquecimento de alimentos, secagem da madeira, fabricação de biodiesel, processos de sinterização de cerâmicas, cura de polímeros, reações de síntese, etc. A energia de micro-ondas age diretamente no material por meio da interação molecular com o campo eletromagnético por micro-onda.

### **2.1 ESTRUTURA DA MADEIRA EM RELAÇÃO À SECAGEM**

Permeabilidade é a facilidade com que um líquido ou gás atravessa a madeira e pode ser determinada experimentalmente pela aplicação da Lei de Darcy em regime saturado, em fase líquida ou gasosa. Os valores da permeabilidade obtidos, dependem sensivelmente das condições experimentais (TANAKA e AVRAMIDIS, 2010).

Entre os fatores influentes, nota-se o comprimento da amostra no sentido do fluxo, o estado da superfície, a utilização de madeira seca e resaturada, o valor do gradiente de pressão (LERINGER, 2011). A permeabilidade da madeira varia de uma espécie para outra, o que é verificado no interior de uma árvore, pois o cerne é menos permeável do que o alburno, assim como partes mais elevadas do tronco mais permeáveis do que as mais baixas (SEVERO, 2000).

Uma observação importante em relação a geometria do plano lenhoso, mostra que a água circula de uma grossa cavidade (fibra) para outra, movimentando-se pelas passagens estreitas das pontuações. Pode-se então perguntar se a pressão capilar que intervém no movimento da água é função do raio das pontuações ou do raio dos lumes dos traqueídeos (BASILICO, 1985).

No que concerne às folhosas, verifica-se que o esquema de circulação dos fluidos geralmente admitido para as folhosas é representado na Figura 1. Observa-se que a movimentação da umidade é amplamente preponderante nos vasos e que a

madeira de folhosa parece um feixe de capilares retilíneos na direção do eixo longitudinal SIAU (1971).

A presença de tilos nos vasos reduz significativamente a permeabilidade nas angiospermas. Portanto, o fluxo de fluidos nas angiospermas é muito mais complexo e variável do que nas gimnospermas.

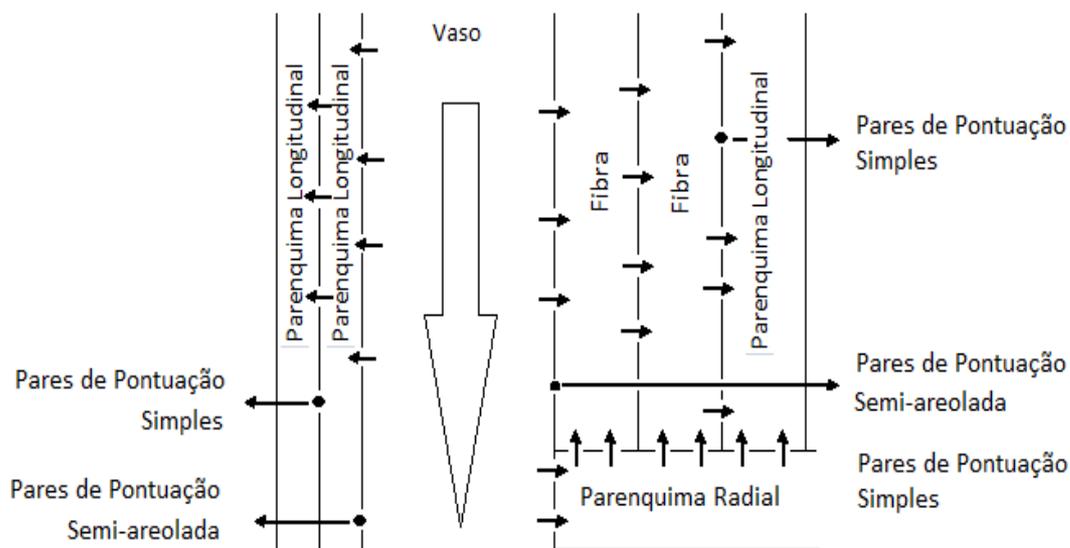


Figura 1. Modelo geral do movimento de água numa folhosa. O tamanho das flechas indica a importância do fluxo.  
Fonte: LEPAGE (1986).

Em pesquisas realizadas por TORGOVNIKOV e VINDEN (2009 e 2010) foram testadas 14 espécies de madeira, sendo 3 folhosas e 11 coníferas onde mostraram que a alta intensidade da potência na secagem por micro-ondas pode modificar a permeabilidade. Concluíram que as mudanças na estrutura de madeira afetaram suas propriedades e a mudança mais importante foi o aumento da sua permeabilidade. Espécies impermeáveis e de baixa permeabilidade podem se transformar em materiais altamente permeáveis, permitindo o fluxo de líquidos e gases dentro de sua estrutura. Um baixo grau de alteração não modifica a densidade da madeira e propriedades de resistência, contudo um elevado grau de modificação diminui a densidade e diminui o MOE e o MOR em função da energia de micro-ondas aplicada (VINDEN *et al.*, 2010).

Na madeira, o transporte de massa é realizado pelos mecanismos de difusão molecular, movimento capilar e convecção ou fluxo de Darcy (HANSSON e ANTTI, 2003b). A difusão molecular é o movimento de moléculas de uma região de alta para uma região de baixa concentração, enquanto o movimento capilar ocorre quando a força intermolecular viscosa entre a água e a madeira é mais forte do que a força intermolecular de adesão da água. O fluxo de Darcy é a relação proporcional do movimento de fluídos através de meios permeáveis e porosos e o gradiente de pressão (VINDEN *et al.*, 2010). A permeabilidade é a capacidade que um meio permeável ou poroso tem para conduzir fluídos ou gases.

A permeabilidade da madeira é uma função da espécie, além de variar em fluxo líquido como em fluxo de gás. Por isso, durante a secagem por micro-ondas, o fluxo de Darcy pode sofrer um fluxo complexo multifásico, se a umidade inicial é maior que o ponto de saturação (CALEGARI *et al.*, 2007). Algumas características influenciam a permeabilidade, como a espécie, a idade, o tipo de madeira, direção das fibras, etc. As espécies de resinosas são menos permeáveis do que as folhosas, assim como o cerne é menos permeável do que o alburno. A idade da madeira e a direção do fluxo também têm influência sobre a permeabilidade. O fluxo ao longo das fibras é maior que o transversal (SIAU, 1971). Em suma, a permeabilidade da madeira é um assunto muito complexo, e ainda tem despertado interesse por parte dos pesquisadores.

## **2.2 CINÉTICA DE SECAGEM**

A cinética de secagem é mais reconhecida quando a evolução do teor de umidade da madeira ou da taxa de secagem é uma função do tempo ou da umidade da madeira. O mecanismo de transporte de calor e massa deve ser aperfeiçoado para melhor entendimento do comportamento da secagem em meio poroso (PEREZ *et al.*, 2013). O modelo 2-poro é o mais simples e pode explicar com sucesso a maioria dos fenômenos de secagens conforme Figura 2 (KEEY, 1978). Neste modelo observa-se que a porosidade no material consiste em capilares interconectados de diâmetros diferentes, verificando-se que no início da secagem, o poro mais largo alimenta o poro mais estreito, conseqüentemente diminuindo seu nível. Depois da maior parte da umidade superficial ter sido removida, a água interior começa a evaporar ocorrendo à secagem em período de taxa constante, sendo dependente das condições externas e da área superficial da amostra. O período conhecido como "período de taxa decrescente"

depende da área da seção transversal dos poros e as posições e comprimentos do menisco (PEREZ *et al.*, 2013). Uma quantidade extra de calor deve ser provida para evaporar a umidade residual do interior com menores temperaturas. Então, para um sistema de 2-poro (Figura 3), teoricamente há três fases do processo de secagem de madeiras: uma taxa constante do período de secagem seguido por dois períodos de taxa decrescentes, conforme explicado por LOPES (2013)

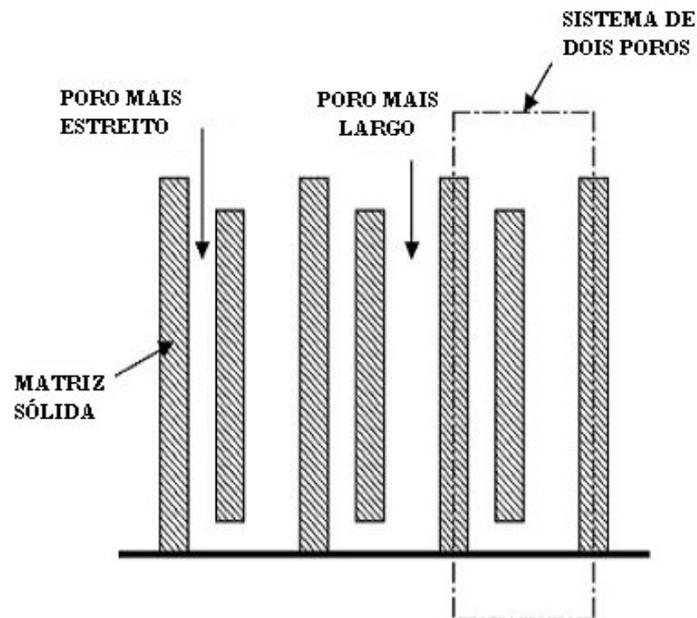


Figura 2. Diagrama esquemático do modelo de 2-poro de secagem.  
Fonte: KEEY (1978).

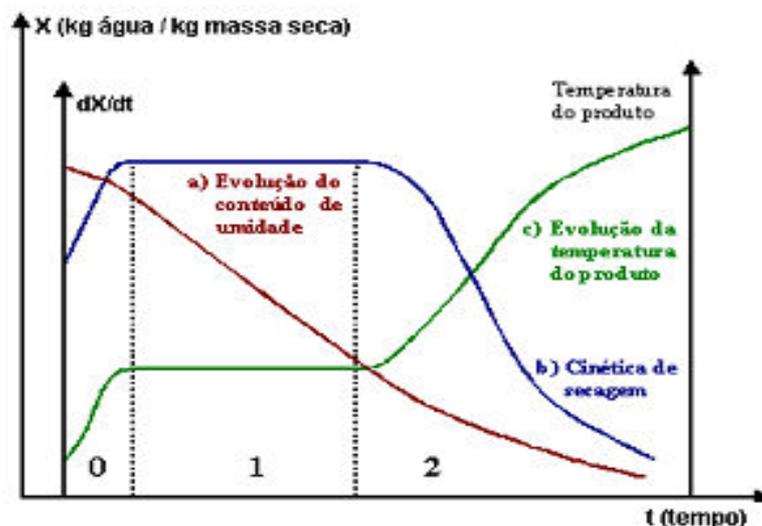


Figura 3. Curva típica de secagem.  
Fonte: BROD *et al.* (1999)

Primeira fase – É observado para madeira muito úmida no início da secagem. Durante esta fase o fluxo interno de umidade alimenta a superfície do material, provocando saturação do ambiente. A primeira fase termina quando as forças capilares tornam-se insuficientes para assegurar a alimentação da superfície pelo fluxo interno. FREIRE (2011) mostrou que a taxa da umidade média de um material no ponto de transição depende somente do produto da velocidade de secagem pela espessura do material.

Segunda fase – No momento em que a superfície do material está no estado higroscópico à velocidade de secagem decresce e as propriedades do produto influem cada vez mais sobre a cinética. Notam-se duas zonas no interior do produto:

1 – perto da superfície, o produto está no estado higroscópico e a migração se faz por difusão do vapor e da água impregnada;

2 – no centro do material, existe água livre que migra por capilaridade. Ocorre então um fenômeno designado por “frente de evaporação”. Esta frente se desloca em direção ao interior do produto e a zona higroscópica ocupa cada vez mais lugar. Quando ela ocupa a totalidade do material começa a terceira fase.

Terceira fase – Nesta fase, o produto encontra-se no estado higroscópico, a velocidade de secagem decresce muito rapidamente. A migração da água se faz por difusão de vapor d’água e de água impregnada. A superfície do material coloca-se progressivamente na umidade de equilíbrio higroscópico com as condições de fluxo externo e a umidade média do material tende igualmente no sentido da umidade de equilíbrio.

### 3 MÉTODOS DE SECAGEM DA MADEIRA

A secagem é uma operação muito discutida na indústria porque constitui, muitas vezes, uma carga muito pesada em tempo, mão-de-obra, investimento e consumo de energia. Por vários anos, muitos métodos de secagem de madeiras têm sido utilizados, mas muito poucos têm provado que pode ter custo razoável e também sem detrimento a madeira. Além do que, a boa execução de operação de secagem é muitas vezes um fator determinante da qualidade final do produto.

A maneira mais comum para extrair a umidade da madeira é na forma de vapor d'água e o calor deve ser dirigido a madeira para produzir o calor latente de evaporação. De acordo com KAUMANN (1983) as abordagens na pesquisa sobre secagem de madeiras são classificadas em 3 (três) requisitos básicos:

- a) Físico - química do material úmido:
  - A energia fornecida para evaporar a água durante o processo de secagem e aumentar a taxa de difusão da água do interior para a superfície da madeira;
  - A ligação entre a água e o material: ligação de hidrogênio, adsorção física ou condensação capilar;
  - As termodinâmicas destas ligações: energia de sorção, atividade da água de impregnação;
  - Interações com a rede molecular da estrutura sólida: retração e inchamento, viscoelasticidade e plasticidade.
- b) Fenômenos de transporte de massa e energia:
  - A umidade relativa do ar que envolve o material em secagem deve ser capaz de receber a umidade que sai da madeira;
  - O transporte maciço no interior do material poroso na fase adsorvida, líquida ou gasosa, assim como o transporte de calor, interações dos gradientes de umidade e de temperatura com o comportamento mecânico do material;

- Mudanças maciças e térmicas na interface material – meio exterior, influencia os parâmetros sensíveis ao escoamento externo.

c) Engenharia do Procedimento:

- Determinação do processo para por em funcionamento a estufa de secagem estudada, verificando a economia de energia, automação, dimensionamento e construção;

- O movimento do ar entre as camadas de madeira, definido pela distância dos tabiques, deve fornecer à superfície da madeira, manter a umidade relativa no nível desejado e remover a água evaporada contida no ar.

Há um grande número de métodos de secagem de madeiras que são utilizados. Porém, serão discutidos a seguir somente os métodos comercialmente mais difundidos.

### 3.1 SECAGEM NATURAL

A secagem natural (Figura 4) ocorre quando as pilhas de madeira verde (úmida) são secas em um pátio de secagem exposta as condições naturais, e segundo RIETZ e PAGE (1971) apud STANGERLIN *et al.* (2009) é o método mais utilizado para a remoção da umidade de uma grande quantidade de madeira. Como este método é exposto em um pátio aberto está sujeito as condições ambientais.

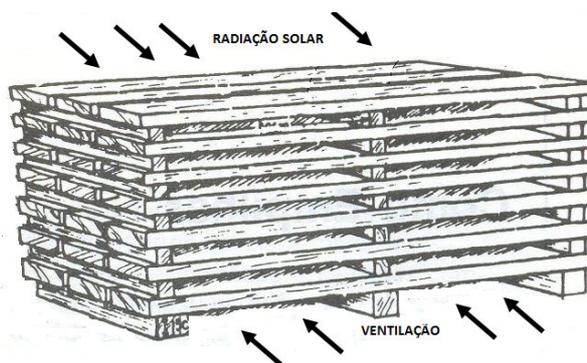


Figura 4. Empilhamento da madeira para uma secagem natural ou ao ar livre.

Fonte: Arquivo do autor.

Segundo STANGERLIN *et al.* (2009) o principal objetivo da secagem ao ar livre ou natural é a utilização do ar ambiente desde que não esteja totalmente saturado

para poder extrair a umidade que é cedida pela madeira. A secagem natural muitas vezes é utilizada como uma pré – secagem sendo a fase final realizada em estufa. Alguns fatores são importantes quanto à espessura, à densidade, o cerne e o albúrnio e a orientação do corte na tábua também influencia na secagem da madeira ao natural (PINHEIRO, 2013).

No Brasil existem poucas informações sobre a secagem natural, porém no consenso geral sabe-se que não é necessário investir em equipamentos caros, gastos com energia, mão de obra especializada, peças de reposição, etc. (ROSSO, 2006). Segundo WENGERT (1971a), o custo para remoção de 1% de umidade ao ar é maior que o custo da remoção dessa mesma umidade em secadores convencionais.

### 3.2 SECAGEM SOLAR

A energia solar começou a ser pesquisada a partir da década de 60, através de JOHNSON (1961), PECK (1962) apud STANGERLIN *et al.* (2009) entre outros, trazendo uma grande contribuição no desenvolvimento de novas tecnologias de utilização, mostrando que a secagem solar consegue apresentar melhor taxa de remoção de água e menor quantidade de defeitos do que a secagem natural. A Figura 5 mostra o secador solar de madeira desenvolvido pelo CPPF do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, para ser utilizado nas pequenas marcenarias, pois não é preciso ser especialista em secagem para manuseá-lo.

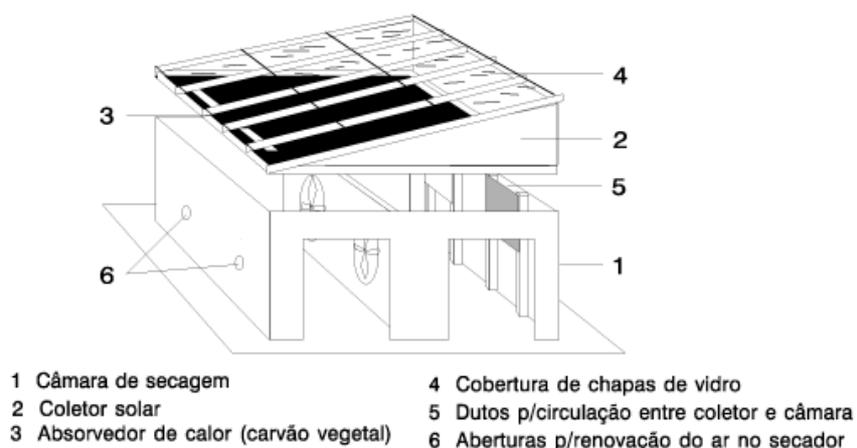


Figura 5. Estrutura do secador solar do INPA<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Disponível em: <http://www.secadorsolar.hpg.ig.com.br/index.html>. Acessado em: 05 de junho de 2009.

O secador solar funciona com base no princípio físico de que a radiação de ondas curtas ao atravessar o material translúcido e transparente (vidro, plástico), transforma-se em radiação de ondas longas. Ao serem transformadas, as ondas longas não conseguem mais atravessar o vidro ou plástico de volta para o meio ambiente, sendo retido no interior do secador o maior tempo possível, entre o teto e a placa coletora (LIMA e CAVALCANTE, 1983). O coletor é o fator mais importante na secagem solar.

TROXELL e MULLER (1968) usando um pireliômetro, determinaram que a energia solar empregada na secagem foi estimada entre 25% a 45%, enquanto WENGERT (1971b) estimou que apenas 16% dessa energia era usada para a secagem. Verifica-se que as perdas ficam entre 55% a 84%. Apesar dessa observação, OLIVEIRA *et al.* (1982) afirmam que a secagem solar é eficiente, de baixo custo, principalmente em regiões onde ocorra radiação solar o ano inteiro.

### 3.3 SECAGEM CONVENCIONAL

A secagem convencional em estufas pode ser descrita como o método padrão mais comum para a secagem controlada da madeira de acordo com MELLADO. (2007). A principal vantagem da secagem em estufa é a redução do período de secagem, possibilitando controlar os defeitos e a possibilidade de eliminação de fungos e insetos.

O princípio da secagem em estufa está em bons equipamentos técnicos, como, aquecedores, ventiladores, dampers e instrumentos capazes de controlar as condições no interior da estufa, além da pilha estar devidamente entabuada. O combustível usado para gerar o aquecimento da caldeira, transforma a água líquida em vapor, e em seguida transfere para o interior da estufa através dos radiadores, gerando o calor de aquecimento interno da câmara de secagem. Esse aquecimento é transferido para o material em secagem através da ventilação que realiza a circulação interna do ar.

ROSSO (2006) verificou que a madeira de *Eucalyptus grandis* demorou 4,45 dias, o *E. saligna* 6,1 dias e o *E. citriodora*, 6,62 dias para secar em estufa convencional, possivelmente devido ao condicionamento ocorrido nesse período. Quando esta secagem é comparada à secagem ao ar livre das mesmas espécies, o *Eucalyptus grandis* demorou 14,2 dias, o *E. saligna* 21,3 dias e *E. citriodora* 27,2 dias durante o verão. Porém, no inverno o tempo de secagem dessas espécies até

aproximadamente o Ponto de Saturação das Fibras foi de 31,2 dias para o *Eucalyptus grandis*, de 39,16 dias para o *E. saligna* e de 47,12 dias para *E. citriodora*, para as condições climáticas de Santa Maria – RS.

Considerando que a secagem em estufa convencional possui um controle mais rígido e mais correto, pode-se dizer que o tempo de secagem é menor quando comparado a secagem natural e solar, e o controle dos defeitos é mais seguro, beneficiando a madeira seca na sua estabilidade dimensional e na qualidade do produto final.

### **3.4 SECAGEM POR DESUMIDIFICAÇÃO**

A secagem por desumidificação ou simplesmente desumidificação é um método atrativo porque seca madeira com qualidade muito alta com um pequeno capital de investimento (DENIG *et al.*, 2000). Entretanto, o tempo de secagem é igual ao da secagem convencional.

O desumidificador é essencialmente uma estrutura fechada na qual a água é removida da atmosfera da estufa, passando por uma serpentina de desumidificação e posteriormente por outra de aquecimento. A umidade neste ar é condensada em forma líquida. Quando o vapor é condensado, há a liberação de 2,3 KJ/g de água condensada que é então utilizada para aquecer o ar desumidificado e retornar para o interior da estufa. Com o ar desumidificado e aquecido é então usado para provocar a evaporação de mais água da madeira, proporcionando a continuação do ciclo (SOLLIDAY *et al.*, 1999).

Devido à desumidificação representar somente a diferença no tipo de energia, não no tipo de ferramentas, o processo de desumidificação é idêntico ao usado pela secagem convencional. Na desumidificação a madeira desenvolve tensões de endurecimento que é removido da madeira pelo aplainamento. Uma equalização normal também é requerida. Equalização e condicionamento podem ser acompanhados por um pequeno vaporizador. O sistema de água em spray pode também ser muito efetivo em algumas situações.

A energia total usada na desumidificação é 50% ou menos do que a usada na estufa convencional. Este benefício é parcialmente compensado pelo maior custo de eletricidade quando comparado com o custo da energia de vapor.

### 3.5 SECAGEM POR AQUECIMENTO DO AR

Hoje em dia a secagem de madeiras com utilização de resíduos, começa a ter grande importância em termos de economia no meio industrial, em função da grande quantidade de resíduos ligno – celulósicos de alto valor energético que são pouco aproveitados (BRASIL, 2009), além de serem de fácil aquisição, tanto no meio madeireiro como no meio moveleiro. Porém, há uma ampla variedade de resíduos gerada nas diferentes áreas da produção, administrativa e auxiliares, tais como, papel, papelão, embalagens, palets, etc. (FELDER e AZZOLINI, 2013).

Para que a secagem ocorra, é necessário que o ar aquecido injetado na câmara de secagem (Figura 5) seja homogeneizado ao ar que já se encontra em seu interior através dos ventiladores. A ventilação não tem só a função de misturar o ar no interior do secador, mas também a de “roubar” a temperatura que está sendo cedida pelo trocador de calor (MELO, 2005). O ar aquecido depois de ficar úmido é realizado a sua renovação no interior do secador, substituindo por outro capaz de absorver água.

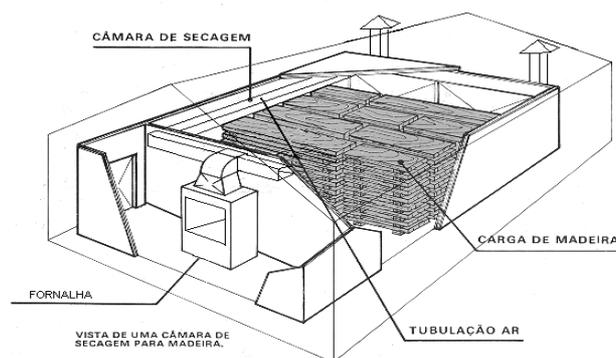


Figura 6. Câmara de secagem de madeiras por queima de resíduo.

Fonte: Arquivo do autor

Em função deste processo não possuir um bico vaporizador com o intuito de aumentar a umidade no interior do secador, eventualmente, utiliza-se o artifício de umidificar o ar utilizando um “balde de água”, no início da secagem com o intuito de abrirem os poros superficiais da madeira, na fase de aquecimento.

### 3.6 SECAGEM POR TRANSIÇÃO VÍTREA

É um processo de secagem de madeiras com base nos mesmos princípios da fabricação do vidro e foi desenvolvido pela EMBRAPA - Amazônia Oriental em parceria com a École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts. Este processo tem a capacidade de reduzir o tempo de secagem em até 1/3 do necessário no processo tradicional em estufa. Este processo utiliza temperaturas entre 60 °C e 110 °C e é único para todas as espécies do mundo.

O processo foi desenvolvido para evitar totalmente as perdas com rachaduras e empenamentos, e uma secagem bem sucedida considera a perda entre 10 e 15% do volume seco (FUJIYOSHI, 2001). No entanto há um alerta quanto à operacionalidade da estufa, pois há o risco de perdas, caso o operador da estufa não tomar os devidos cuidados. Como o processo é operado a altas temperaturas, o processo é minucioso e a velocidade da elevação da temperatura pode comprometer a produção.

### 3.7 SECAGEM POR MICRO-ONDAS

Apesar de ser uma tecnologia recente no Brasil, porém na Europa, os primeiros relatórios sobre a utilização de micro-ondas, que é um processo rápido, foram publicados entre 1950 e 1960 (LEIKER *et al*, 2011). Quando aplicado em folhosas tem a capacidade de evitar algumas desvantagens do aquecimento e ventilação da secagem convencional causado pela transferência externa de calor e massa, como o longo tempo de secagem e o controle limitado. Por conta de seu grande sucesso em melhorar as propriedades físicas dos materiais, redução do impacto ambiental no processamento dos materiais, vantagens econômicas de energia, espaço e tempo, é uma oportunidade para as pequenas e micro empresas produzirem de forma confiável os produtos de madeira.

#### Aspectos Gerais da Secagem

Uma onda eletromagnética possui dois componentes, um no campo elétrico ( $E$ ) e outro no campo magnético ( $H$ ), que oscilam em um ângulo reto entre si (Figura 7), e são perpendiculares à direção de propagação. A frequência utilizada no experimento foi 2.450 GHz que de acordo com o Instituto Internacional de Potência de Micro-ondas (IIPM) é atribuída como uma das principais frequências de micro-ondas, pois são utilizadas para fins industriais, científicos e médicos (OSEPCHUK, 2002). As

micro-ondas proporcionam um aquecimento rápido e volumetricamente interno, por isso tem sido amplamente utilizada para aquecer, secar e derreter vários materiais dielétricos. A profundidade da penetração de um aplicador de 0.915 GHz é aproximadamente três vezes maior do que um aplicador de 2.450 GHz, por isso, os aplicadores de 0.915 GHz têm maior eficiência de secagem e redução de custos em comparação com as unidades de 2.450 GHz, porém são necessários dispositivos complexos para controlar as interferências geradas para aplicações gerais de secagem tornando com isso os custos de produção relativamente mais caros (GAO, 2010).

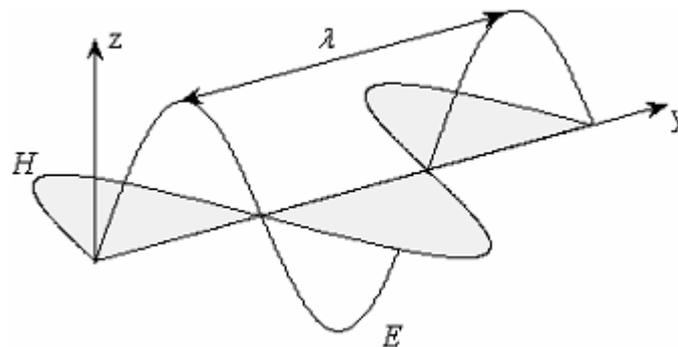


Figura 7. Onda monocromática eletromagnética polarizada no plano y-z.

Fonte: COMMITTEE ON MICROWAVE PROCESSING OF MATERIALS (1994).

O mecanismo de micro-ondas para secagem é complexo e ainda está sob investigação. A energia das micro-ondas é absorvida por dois mecanismos: condução iônica e rotação dipolar. A rotação dipolar é dominante para os materiais com alta quantidade de água livre (McLOUGHLIN *et al.*, 2003). Quando o material dielétrico é exposto ao campo de micro-ondas, os íons, átomos e moléculas são excitados e movem-se sob a influência do campo elétrico, de tal forma que colidem com outros organismos e, portanto, a energia cinética, que pode ser considerada calor é transferida neste processo. Em um material com alta quantidade de água livre, muitas moléculas são dipolos e se tornam dipolos induzidos quando as moléculas estão expostas a um campo elétrico. As moléculas são normalmente orientadas aleatoriamente em um líquido, ou material com grande quantidade de água livre (GAO, 2010). No entanto, o campo elétrico tende a alinhar com a rotação campo – dipolo. Com as flutuações do campo estes processos de alinhamento e relaxamento ocorrem milhões de vezes por segundo, convertendo a energia elétrica em energia potencial e em seguida em energia cinética aleatória, ou seja, em calor.

As potenciais vantagens da secagem por micro-ondas podem ser verificadas em 3 (três) características (MAYS, 2005). Em primeiro lugar, as micro-ondas penetram no interior dos materiais e depositam diretamente a energia, ou seja, o calor a ser gerado em todo o volume do material. É possível neste caso, conseguir o aquecimento rápido de muitos materiais. Em segundo lugar, além do aquecimento volumétrico, o forno de micro-ondas pode ser utilizado para aquecimento seletivo. Materiais muito úmidos normalmente tem um fator de perdas dielétricas relativamente altas em comparação com os outros componentes, por isso a secagem por micro-ondas pode ser intrinsecamente auto-regulável, levando ao fenômeno de nivelamento automático da umidade e, finalmente, a secagem eficiente. Em terceiro lugar, a energia de micro-ondas usa energia apenas quando necessária e está disponível instantaneamente, tornando o processo mais adequado para o controle automático.

Por ocasião do aquecimento do material, este fenômeno pode ser observado, principalmente quando do aquecimento de alimentos em fornos de micro-ondas domésticos. A Figura 8 mostra a indução eletromagnética das micro-ondas causando a reorientação dos dipolos das moléculas de água do alimento, resultando no aquecimento destas moléculas, provocando então o seu aquecimento.

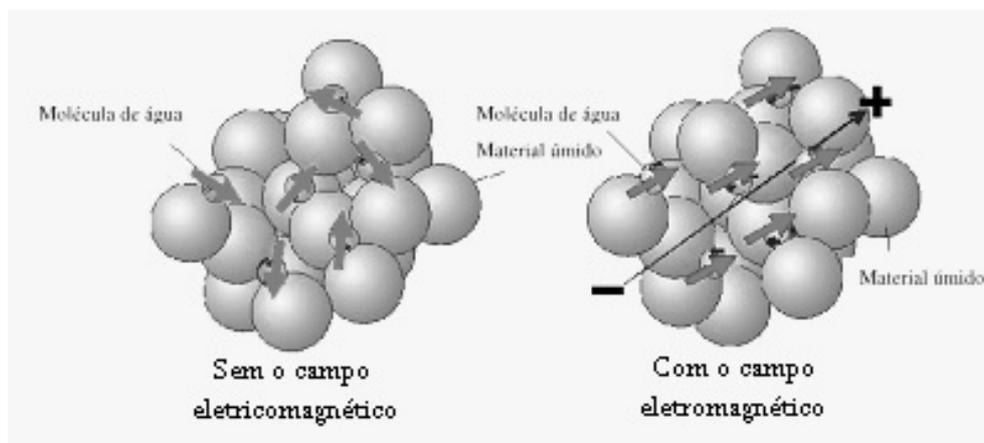


Figura 8. Indução do campo eletromagnético nas moléculas da água.  
Fonte: MAYS (2005).

A distribuição de temperatura na amostra também é especial para secagem por micro-ondas. A madeira é um meio dielétrico, higroscópica, porosa e heterogênea e os diferentes materiais na matriz madeira têm permissividades diferentes e, portanto, sua resposta à radiação de micro-ondas é diferente. Para HANSSON (2007), madeira com alto teor de umidade, acima do Ponto de Saturação das Fibras, absorve

uma grande quantidade de energia eletromagnética, por isso considera-se que a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura é determinada pela capacidade do valor do calor específico. Algumas espécies de madeiras são boas absorvedoras de micro-ondas e alcançam temperaturas mais elevadas em um curto espaço de tempo, enquanto alguns materiais são quase transparentes à radiação de micro-ondas. No entanto, deve haver alguma transferência de calor entre esses materiais. Além disso, os fornos por micro-ondas não demandam uma ventilação forte, como as estufas de secagem que utilizam o aquecimento por convecção, adequando uma economia de energia não desprezível (MORAES, 2004).

Quando o material a ser seco não é considerado um supercondutor, a corrente elétrica acarretará o aquecimento devido à sua resistência elétrica, também conhecida como aquecimento resistivo (COVOLATO, 2007). Materiais metálicos condutores não sofrem aquecimento efetivo por micro-ondas, pois parte das ondas eletromagnéticas submetidas são refletidas.

A secagem por micro-ondas pode ser considerada um processo híbrido porque envolve a condução e a convecção do aquecimento, igual ao processo convencional. De tal modo, HANSSON (2007) verificou que a temperatura varia ao longo da amostra em testes de secagem por micro-ondas. YANG e GUNASEKARAN (2004) propuseram modelos para prever a distribuição de temperatura no interior da amostra durante aquecimento de micro-ondas, pois distribuição de temperatura foi reduzida quando o aquecimento de micro-ondas de pulso foi usado.

Apesar do aquecimento direto por micro-ondas oferecer muitas vantagens sobre a transferência de calor convencional, o mecanismo de transferência de energia para aquecimento por micro-ondas tem diferentes resultados em várias etapas do processamento. Em primeiro lugar, a secagem desigual é uma característica distinta das micro-ondas de secagem, que pode ser atribuída aos mecanismos de geração de calor reversíveis e eventuais flutuações do campo eletromagnético aplicado causado por fatores inevitáveis do exterior. Em segundo lugar, quando os materiais estão sob uma radiação de micro-ondas, muitas vezes sofrem transformações físicas e estruturais que afetam suas propriedades dielétricas (GAO, 2010). Assim, a capacidade de micro-ondas para gerar calor varia durante o processo. Fortes transformações levam a uma mudança significativa nas propriedades dielétricas e causam dificuldades na modelagem e

controle, pois pode acelerar o processo de secagem por micro-ondas, ocasionando defeitos. Os excelentes absorvedores de micro-ondas e facilmente aquecidos são os dielétricos, pois são mais adequados para secagem de micro-ondas.

Materiais com alta condutividade produzem baixa penetração das micro-ondas, enquanto os de baixa condutividade produzem pouco aquecimento (XIA e PICKLES, 1990). A energia de micro-ondas é distribuída por meio da interação molecular com o campo eletromagnético no aquecimento e o único elemento a ser aquecido é a água no interior do material poroso em comparação a outros materiais.

Porém, se a condutividade térmica é baixa, o fator de perda aumenta resultando no aumento da temperatura e gera uma pequena mancha de cor escura na madeira. Se esse aquecimento ocorre sem a presença de oxigênio, e geralmente no final da secagem, provoca a pirólise (formação de carvão) (HANSSON, 2007).

LEIKER (2007) e GAO (2010) analisam a qualidade, a cinética, as propriedades dielétricas, a aplicação de micro-ondas, o mecanismo de aquecimento e a secagem por micro-ondas. As elevadas taxas de secagem produzidas pelo uso da micro-ondas desempenham um importante papel na avaliação da viabilidade econômica. Contudo GAO (2010) esclarece que a secagem por micro-ondas é mais adequada quando as espécies de madeira possuem baixo teor de umidade inicial e problemas de degradação na secagem convencional.

MACHADO (2006) verificou que pequenas amostras de madeira de Carvalho apresentaram perda significativa de resistência à compressão, quando expostas às micro-ondas de 550W, de 5min para cerca de 10 minutos de exposição, não sendo possível concluir se os fatores de segurança foram aplicados, pois não foi medida a temperatura na superfície e nem no núcleo das peças durante o tratamento de controle de secagem por micro-ondas.

### **Densidade e Profundidade de Penetração de Micro-ondas**

A utilização de micro-ondas para prever o teor de umidade e densidade seca em madeira, foi estudada por LUNDGREN *et al.* (2006) a partir de imagens obtidas pelo digitalizador. HANSSON *et al.* (2005a) esclarecem que para a obtenção de boa imagem deve-se obter uma boa correspondência em valores medidos e teóricos no

deslocamento da fase. Porém, os mesmos autores (HANSSON *et al.*, 2005b) mostram que reflexos e espalhamentos criam mais ruído na digitalização da imagem por micro-ondas. De acordo com LUNDGREN *et al.* (2006), se a distribuição de umidade é uniforme, é possível prever a densidade seca para cada 8 x 8 mm de pixel.

Para uma compreensão prática melhor do significado dos valores das propriedades dielétricas, pode ser calculada uma profundidade de penetração dessas propriedades. Teoricamente, a profundidade de penetração  $D_p$  de acordo com GAO (2010), é definida como a distância abaixo de uma superfície plana de grandes dimensões onde a densidade de potência de um avanço perpendicular, propagando uma onda plana eletromagnética é enfraquecida pelo 1/e (aproximadamente 37%) do valor superficial. Além desta profundidade, o aquecimento volumétrico devido à energia de micro-ondas, é desprezível. A profundidade de penetração é determinada pela Equação 1.

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi(2\varepsilon_r')^{\frac{1}{2}}} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Onde

$\lambda_0$  = é o comprimento de onda em espaço livre.

$\varepsilon_r'$  = é a constante dielétrica real relativa (ou constante dielétrica relativa);

$\varepsilon_r''$  = é a constante dielétrica relativa imaginária (ou fator de perda dielétrica relativa) do material.

$\varepsilon'$  = é a parte real da constante dielétrica e é chamada a constante dielétrica;

Os aumentos de penetração de profundidade com frequência inversamente proporcional ao comprimento de onda ( $\lambda = \frac{c}{f}$ ) (frequência decrescente), com o decréscimo relativo da constante dielétrica imaginária e com decréscimo da constante dielétrica real.

A potência de absorção e o processamento de um material de micro-ondas são mais complexos. As propriedades dielétricas são dependentes da movimentação dos dipolos no interior da estrutura, e são funções da temperatura, da frequência, pela reação do sistema e pelo grau de reação. Então, a habilidade de um material em absorver energia de micro-ondas muda durante o processamento (LEIKER, 2007). Estas condições de mudança dificultam o estudo atual do processamento de secagem por micro-ondas.

### **Massa da Amostra**

No decorrer do processo de secagem, a temperatura aumenta resultando em uma pressão interna de vapor e mudança no volume em função das interações entre as micro-ondas e os materiais. Ao mesmo tempo, a água contida nos materiais também aumenta quando ocorre o aumento da massa e conseqüentemente o volume. Assim, se o teor de umidade exceder o ponto de saturação das fibras, então a água será forçada a sair da madeira em função do aumento da pressão interna durante o processo de aquecimento (HANSSON e ANTTI, 2005).

O calor interno das micro-ondas é gerado e transferido para o exterior da amostra através de condução térmica convencional. Na superfície, o calor pode ser transferido por transmissão e/ou radiação. Para amostras com grande massa, a parte mais espessa age como isolamento, pois reduz perda de calor. Maior absorção de energia e menor perda de calor resultam em um melhor desempenho da secagem e temperaturas finais mais altas. Porém, se a pressão interna é maior do que a resistência da madeira, poderão ocorrer defeitos, como rachas internas, afetando a propriedade de resistência da madeira e como conseqüência a sua desvalorização (MACHADO, 2006).

### **Influência do Teor de Umidade Inicial**

Considerando que o material a ser seco seja composto de sólido seco mais água, verifica-se que existem em duas formas de água ou umidade: água livre que está localizada nos vazios, poros e vasos capilares e, água de impregnação nas paredes celulares. Quando materiais úmidos são expostos contra radiação de micro-ondas, a potência absorvida é diretamente proporcional ao fator de perda dielétrica (GAO, 2010), que é uma função do sólido, da água de impregnação e da água livre. A água livre

contida no material, em grande parte determina o valor do fator de perda. A dependência do fator de perda dielétrica no teor de umidade livre a uma temperatura constante é semelhante para a maioria dos materiais. Quando a maior parte da água livre é evaporada, o fator de perda da água de impregnação do sólido torna-se importante. Como regra geral, a contribuição de cada componente é proporcional à fração do volume total que ocupa.

LEIKER e AURICH (2003) não encontraram diferença significativa no teor de umidade final para a madeira de Faia com um teor de umidade inicial de 73,5%, quando secos por micro-ondas a vácuo, secagem por micro-ondas sob pressão atmosférica e um programa de secagem convencional. Material seco por micro-ondas a vácuo apresentou valores ligeiramente altos, cerca de 1% da umidade relativa. Aparentemente, a potência específica da micro-ondas aplicada é decisiva para esta diferença, por isso na maioria das vezes, no final da secagem, a temperatura e os perfis de umidade tem uma forma semelhante.

Verifica-se na Figura 9 que há duas regiões importantes AO e OB. Na região OA,  $\varepsilon_r''$  é proporcional ao teor de umidade, que corresponde à remoção de água livre. A quantidade de energia de micro-ondas sendo linearmente dependente do teor de umidade em um campo elétrico constante, resultando em que, qualquer variação de umidade ao longo do produto será nivelada automaticamente, produzindo um produto final com uma variação de umidade muito pequena em toda sua extensão. Este nivelamento automático da umidade representa uma vantagem expressiva contra o processo de secagem convencional térmico. Na região OB,  $\varepsilon_r''$  é fracamente dependente do teor de umidade, não ocorrendo nivelamento significativo da umidade. O teor de umidade na interseção de 'OB' com a curva atual é o nível ótimo para aquecimento dielétrico e bastante baixo (aproximadamente 4%), favorecendo a remoção da água de impregnação do sistema (GAO, 2010).

A água líquida livre aparece em materiais úmidos e é fisicamente absorvido em material capilar ou cavidades ou quimicamente ligado a outras moléculas do material. O material úmido é uma mistura não homogênea, contendo substâncias com propriedades dielétricas desconhecidas, difícil de entendê-la completamente e de difícil precisão do comportamento dielétrico do material.

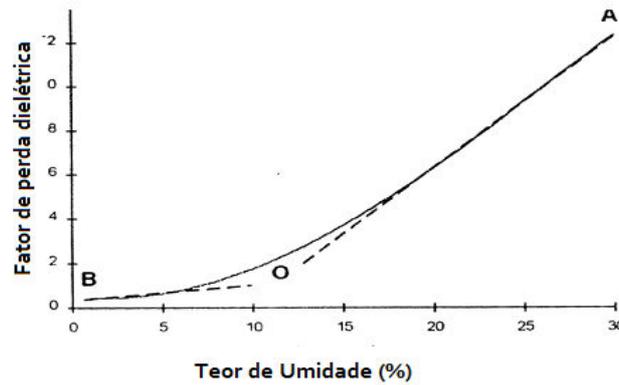


Figura 9. A dependência de  $\varepsilon_r''$  (eff) sobre o teor de umidade.

Fonte: JONES *et al.* (2002) apud GAO (2010).

Por isso, o comportamento de sorção do cerne de Abeto e Pinus Escocês foi melhorado através de micro-ondas, porém este efeito foi mais pronunciado para o cerne de Scots pine do que para a madeira de Abeto (TREU *et al.*, 2008).

## Temperatura

A temperatura de secagem por micro-ondas influencia principalmente as propriedades dielétricas e esta dependência é uma função do processo de relaxamento dielétrico. Como a temperatura aumenta com a diminuição do tempo de relaxamento, assim a frequência de relaxamento de dipolo ( $f_D$ ) é definida na Equação 2, como o inversamente proporcional ao tempo de relaxamento ( $\tau$ ), e determina a resposta da micro-ondas de um material dielétrico.

$$f_D = \frac{1}{\tau} \quad (2)$$

Quando a frequência da micro-ondas ficar igual à frequência de relaxamento do dipolo, este absorverá o máximo de energia da micro-ondas que é então convertida em calor. Quando o pico da frequência da micro-ondas aplicada fica igual à frequência de relaxamento de dipolo, a energia máxima da micro-ondas é absorvida. Neste caso o fator de perda do pico substituirá frequências maiores em temperaturas elevadas.

GAO (2010) mostra que, a constante dielétrica aumentará com o aumento da temperatura, considerando que o fator de perda pode aumentar ou diminuir, dependendo da frequência de operação ser mais alta ou mais baixa que a frequência de

relaxamento. De acordo com HANSSON e ANTTI (2003a), a temperatura tem um menor efeito na profundidade de penetração de energia, quando está separadamente da fase de transição a zero grau. A energia de micro-ondas penetra mais profundamente na madeira congelada do que na madeira na temperatura ambiente.

## 4 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

A importância da técnica da estatística na idealização da pesquisa se distingue pela possibilidade que os resultados analisados tenham as causas de suas variações conhecidas, isto é, uma parte que se deve às condições submetidas aos materiais experimentais ou tratamentos e a outra parte que se deve ao erro aleatório, ou seja as causas aleatórias de variação.

O estabelecimento e definição dos objetivos da pesquisa são básicos para um planejamento da pesquisa, pois as hipóteses são estabelecidas em termos científicos, posteriormente, expressas em termos estatísticos. Deve haver uma perfeita equivalência entre as hipóteses científica e estatística para evitar equívocos.

O delineamento experimental precisa fazer parte do planejamento do experimento, aceitando que as hipóteses estatísticas possam ser analisadas posteriormente a obtenção dos resultados. O delineamento é uma série de passos planejados e instituídos para garantir que dados amoldados e de qualidade sejam conseguidos, de forma a aceitar uma análise objetiva que leve a conclusões adequadas em relação ao problema proposto. Os objetivos do plano experimental, quando bem planejado serve para verificar os efeitos das variáveis, discriminar modelos, estimar parâmetros ou otimizar o processo. Necessitam ser conhecidas as variáveis que serão analisadas, medi-las e qual a região experimental de interesse e qual o erro cometido no experimento, pois a qualidade do modelo e dos parâmetros estimados é proporcional ao erro experimental calculado. Além disso, é importante e imprescindível distinguir o número de experimentos a serem concretizados e as réplicas. O delineamento aventa princípios que adicionam as unidades experimentais aos tratamentos e determinam os distintos planos experimentais (delineamentos). Há dois arranjos em um delineamento: a) estrutura de tratamento e b) estrutura de delineamento.

### a) Estrutura de Tratamento

O conjunto de categorias experimentais de interesse, atribuídas pelo pesquisador, com o escopo de examinar as suas implicações sobre as variáveis respostas escolhidas. Os tratamentos são formados pelos níveis ou categorias de um fator ou por

acordos de níveis de dois ou mais fatores, nos arranjos fatoriais ou em parcelas subdivididas.

#### b) Estrutura de delineamento

Foi utilizado neste experimento um fatorial  $3^3$  em um delineamento inteiramente casualizado abalizado no grau de aleatoriedade do planejamento e da quantidade de vezes que foram realizados os experimentos. O maior número possível de experimentos e a repetição ordenada de dados deve ser mais informativa sobre um sistema, pois quanto mais confiável é o resultado obtido maior é a capacidade de julgamento. Por isso, um plano é considerado estatisticamente ideal quando o experimento é aleatório, com maior número de experimentos e réplicas.

Alem disso, é fundamental no planejamento e delineamento de um experimento a aplicação dos princípios da experimentação, ou seja, repetição, casualização e controle local. Nos experimentos comparativos e na pesquisa experimental a resposta de interesse deve ser sempre o diferencial dos efeitos dos vários tratamentos, testando algumas hipóteses estatísticas. A quantidade de variação que ocorre nos dados observados é a estimativa do erro experimental, mesmo que os efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta fossem todos iguais na população. A estimativa do erro experimental só é obtida quando há repetição no experimento. O tamanho e a representatividade da amostra é uma função do número da variável resposta nas unidades experimentais. Por isso, quanto maior a variabilidade maior será o número de repetições, pois a repetição é necessária para permitir uma estatística do erro experimental, ou seja, a variância. É importante notar que o erro não é engano, mas a variação de causas aleatórias que são difíceis de controlar.

A casualização, outro aspecto fundamental, permite que um tratamento, ao longo da pesquisa não tenha favorecimento ou desfavorecimento, ou seja, a distribuição aleatória das unidades tenha a mesma chance de receber um tratamento, retirando a influência consciente ou não do pesquisador. Por isso, a repetição e a casualização necessitam estar presente em todo o planejamento experimental.

Para resolver a restrição à casualização dos tratamentos que é imposta pela heterogeneidade dos experimentos, utiliza-se o recurso de controle local. Esse recurso é utilizado em unidades experimentais em quantidade suficiente para aplicar

todos os tratamentos pelo menos uma vez, em cada grupo. Por isso, esse recurso é aplicado quando se tem conhecimento anterior da variação no ambiente ou no material do experimento, onde não é possível uma casualização completa dos tratamentos para todas as repetições do experimento. A casualização é feita por blocos ou grupos de unidades experimentais homogêneas. A adoção do controle local purifica a estimativa do erro experimental.

A obtenção dos dados é uma das etapas importantes em uma pesquisa, pois se trata da coleta de dados que trazem consigo a medida do efeito dos fatores tratamentos sobre as variáveis medidas ou variáveis respostas. Pode ocorrer que, em um experimento, se adote o delineamento inteiramente casualizado, porém ao se planejar a coleta de dados, observa-se que por diversos motivos, a obtenção dos dados não poderá ocorrer de forma homogênea, ou seja, o delineamento escolhido não poderá ser adotado na fase de coleta dos dados, e um fator de restrição na casualização será imposto, para que a obtenção dos dados possa transcorrer de forma eficiente e confiável. Assim, na fase de planejamento do experimento deve-se ter bem clara a forma de coleta das observações a serem geradas pela pesquisa, incluindo a escala apropriada de medida da variável dependente.

Após a coleta dos resultados do experimento, os dados experimentais devem ser analisados através de uma análise estatística para testar as hipóteses formuladas. O planejamento experimental é uma etapa obrigatória na realização do experimento, mas o pesquisador pode optar por uma análise descritiva e não realizar testes de hipóteses estatísticas. Contudo, na pesquisa experimental se o comportamento da variável resposta é buscado em função das variáveis independentes, a análise estatística e os testes de hipóteses são indispensáveis.

O número de experimentos depende dos níveis estudados de cada variável e, também depende do número de repetições que são realizadas. Pois, quando o ensaio envolve um grande número de variáveis, o número de experimentos aumenta de forma fatorial, em função do plano ser realizado através de ajustes de condições. O número de experimentos (NE) em um plano depende dos níveis ( $l_i$ ), do número de variáveis independentes (NX) e do número de réplicas (NR), conforme Equação 3.

$$NE = \left( \prod_{i=1}^{NX} l_i \right).NR \quad (3)$$

A técnica de planejamento norteia a opção do número mínimo de condições e de repetições, pois o número mínimo de experimentos motiva a perda da qualidade de informações e induz a erros maiores do que no caso ideal.

### **Método de Superfície de Resposta - MSR**

Quando o plano experimental é armado, a distribuição das variáveis do processo deve ser o mais uniforme e normalizado possível, com a finalidade de poder-se utilizar modelos empíricos do tipo polinomial. Como as variáveis do processo estão difundidas uniformes na região experimental, a normalização das variáveis do processo ( $x_i$ ) é feita de costume que as variáveis normalizadas ( $x_{i(\text{normalizado})}$ ) tenham valores entre -1 (menos um) e +1 (mais um), com o ponto central de valor 0 (zero), conforme Equação 4.

$$x_{i(\text{normalizado})} = \frac{x_i - \left( \frac{x_{i(\text{max})} + x_{i(\text{min})}}{2} \right)}{\left( \frac{x_{i(\text{max})} - x_{i(\text{min})}}{2} \right)}, \quad (-1 < x_{i(\text{normalizado})} < +1) \quad (4)$$

O Método de Superfície de Resposta - MSR (Response Surface Method - RSM), é uma técnica estatística baseada em planejamentos fatoriais, tendo a função de determinar as melhores condições e dar maior conhecimento sobre a natureza de certos fenômenos, foi introduzida por G. E. P. Box na década de 1950 (BARROS NETO *et al.*, 2010).

A MSR vem sendo estudada com grande sucesso na modelagem de diversos processos industriais, e em função disso, sua aplicação permite selecionar a combinação de níveis considerados ótimos na obtenção da melhor resposta para uma dada situação. Por isso é que, usando a MSR, é possível aproximar um modelo empírico a uma relação que pode ser desconhecida ou mesmo conhecida, entre os fatores e as respostas do processo.

Neste método os resultados dos planejamentos fatoriais realizados são ajustados através de modelos matemáticos. A MSR possui duas etapas distintas. Essas etapas conhecidas como "modelagem" e "deslocamento" podem ser repetidas quantas vezes se fizerem necessárias, e tem por escopo atingir a região investigada considerada ótima. A modelagem em geral é realizada no ajuste de modelos lineares ou quadráticos com respostas alcançadas com planejamentos fatoriais ou fatoriais ampliados. A modelagem ocorre em busca do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, sendo o caminho onde a resposta varia de forma mais pronunciada (BARROS NETO *et al.*, 2010). Por outro lado, o deslocamento ocorre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, ou seja o progresso será mais rápido se o deslocamento for realizado ao longo de uma trajetória perpendicular às curvas de nível, isto é, se for seguir um caminho de máxima inclinação da superfície ajustada (BARROS NETO *et al.*, 2010).

A MSR possui uma demanda muito importante relacionada a seleção da faixa inicial de variação dos fatores, que é a determinação do tamanho do primeiro planejamento e, por conseguinte a escala de codificação e a velocidade relativa com que os experimentos posteriores se deslocarão ao longo da superfície de resposta. Sendo a escala muito ampliada, o deslocamento será mais rápido, contudo estará correndo riscos de sair da região linear da superfície ou mesmo precipitar-se do outro lado do morro. Este fato acarretaria em se perder a oportunidade de descoberta da direção do ponto ótimo.

Segundo BARROS NETO *et al.* (2010), não existe como determinar a melhor escala, além de não ser encontrado em nenhum livro de estatística, pois depende de cada problema. Além disso, os mesmos autores esclarecem que o experimento deve apoiar-se em todo o conhecimento disponível e escolher deslocamentos nem tão pequenos que não produzam efeitos significativos e nem tão grandes que varram faixas exageradas dos fatores.

O relacionamento em meio as respostas e as condições de fatores procura alcançar um dos objetivos: *i*) constituir uma definição de como uma resposta é comprometida por um número de fatores em uma determinada região de mérito; *ii*) analisar e explorar a analogia entre várias respostas, e *iii*) encontrar e explorar o contorno da resposta.

A MSR é favorável quando não se distingue a semelhança exata entre os fatores. Em meio aos benefícios da metodologia, a fundamental é que seus efeitos são resistentes aos choques de classes não ideais, como erros aleatórios e alvos atuantes, porquanto a metodologia é vigorosa. Outro proveito é a naturalidade analítica da superfície de resposta alcançada, já que o procedimento origina polinômios. Como polinômios de duas ou mais variáveis podem afetar a resposta, torna-se imprescindível a utilização de metodologia clássica de otimização do procedimento ou sistema modelado por superfícies de resposta.

O processo do planejamento fatorial permite medir o choque das improbabilidades e é útil para melhor concepção da regra, admitindo a apreciação individual do resultado de cada variável na resposta desejada (RODRIGUES e IEMMA, 2005). O Método de Superfície de Resposta e a técnica do Planejamento Fatorial deverá se mostrar eficiente para determinar as condições ideais da secagem da madeira de Louro - preto por meio do processo utilizando micro-ondas.

## **Discretização**

Os modelos de previsão de tempo globais começaram a ser pesquisados por volta de 1960 com emprego em previsão numérica do tempo, climatológicas, etc. conforme WILLIAMSON (2007), contendo as mesmas equações, mas com escalas de tempo distintas. Estas equações podem ser resolvidas em malhas uniformes em coordenadas esféricas de latitude e de longitude. Esse tipo de malha apresenta uma concentração de pontos próxima aos polos, mostrando que os passos de tempos sejam muito pequenos em métodos de diferenças ou de volumes finitos. Na realidade, a utilização de malhas uniformes em coordenadas esféricas mostram boas propriedades de discretização de EDPs, como ortogonalidade, porém chega a determinar um esforço computacional suplementar para definir as dificuldades dos polos (PEIXOTO, 2013).

Porém, para cada situação existem ferramentas que automatizam o estabelecimento da discretização e seus critérios. A discretização é a forma mais comum e consiste simplesmente em dividir o problema em elementos de iguais dimensões dispostos na forma de uma grade (SETTI, 2012).

Os modelos atmosféricos utilizando malhas icosaédricas nesta última década obteve grande melhoria, sobretudo do ponto vista prático, porém problemas

mais teóricos ligados à discretização de certos operadores e de interpolações, ainda não estão resolvidos com grande grau de certeza (PEIXOTO, 2013). Um problema é a interferência de malha (grid imprinting) que ocorre ao ser discretizado certos operadores diferenciais ou interpolações feitas, pois um padrão de malha na distribuição do erro é observado (WELLER *et al.*, 2012). Esse tipo de problema pode gerar instabilidades na solução numérica obtida para modelos atmosféricos, seguramente deve ter sido observado na modelagem com malhas icosaédricas. Esse problema foi descrito por TOMITA *et al.* (2001), onde descreve esse padrão para o divergente quando discretizado na malha de Voronoi que é formada por polígonos, como hexágonos e pentágonos. Em WELLER *et al.* (2012) o problema é apresentado para diversas malhas geodésicas, incluindo a icosaédrica.

A discretização é em geral divergente com base nos fluxos nos pontos médios das arestas das células computacionais, tendo como ferramenta auxiliar o Teorema da Divergência. O uso de malhas icosaédricas na modelagem atmosférica, mostrou um curioso modelo entre o erro de discretização do operador divergente e a estrutura geométrica da malha. TOMITA *et al.* (2001) mostra que o padrão de interferência de malha no erro de discretização do divergente é conferido a um problema de distorção das células computacionais. Verificaram que o modelo achado estava correlacionado com regiões de variações na distribuição de área e distorção das células, e sugeriram uma otimização de spring dynamics.

A questão do alinhamento dos polígonos, mesmo que seja distorcido, ou seja os lados de tamanhos diferentes, a convergência será de segunda ordem, não sendo a distorção o motivo de erro na estimativa do divergente, mas sim o alinhamento das células. Por isso, não é aceitável ter-se malhas com distorções, pois para garantir convergência quadrática em células alinhadas, a hipótese a ser utilizada deve ser maior ou igual uma constante vezes o diâmetro, que por sua vez impõe um limite para o grau de distorção. Para aumentar a ordem de discretização do divergente é indicado uma integração de alta ordem na aresta da célula computacional, mas se for usado um ponto como referência para o divergente médio da célula, ficará restrito a um erro de segunda ordem. Os métodos de otimização de malhas abrandam os erros, mas o método de discretização do divergente continuará de primeira ordem. Pode ser possível a construção de método de otimização que melhore o alinhamento das células, porém, por

conta dos pentágonos, a discretização do divergente irá continuar sendo de primeira ordem.

## **Análise de Sensibilidade**

Análise de Sensibilidade é uma etapa que identifica as variáveis mais importantes na Análise de Decisão, mas não mede o risco associado a essas variáveis. De modo geral, a análise de sensibilidade é utilizada para: (i) tomar melhores decisões, (ii) decidir quais dados estimados devem ser refinados antes de tomar uma decisão e, (iii) concentrar-se nos elementos críticos durante a implementação (BOX e DRAPER, 2007).

É normal que um estudo de viabilidade dos dados apresente um fator de incerteza intrínseco e a análise de sensibilidade não evita este princípio. Além disso, a análise de sensibilidade pode ser alcançada analisando o impacto de mudanças **in base-case assumptions** e impacto do valor do **pay-off**. No primeiro caso, a sensibilidade do valor da variável dependente é devido à alterações dos valores das variáveis independentes, e no segundo, é devido à modificações dos valores das probabilidades de acontecimento dos eventos aleatórios em um problema de análise de decisão (MYERS *et al.*, 2009). Todavia, existem problemas decisórios diferenciados por eventos aleatórios com maior número de estados da natureza, os quais são de complicada apreciação.

Os processos decisórios avaliam a presença de tomadores de decisão e, as opiniões dos tomadores de decisão são expressas por meio de critérios, que auxiliam a hipótese de soluções para um problema (BOX e DRAPER, 2007). A Avaliação Multicriterial é uma técnica utilizada para a tomada de decisão, a qual agrupa a opinião de um grupo de tomadores de decisão em um mesmo processo decisório (VALENTE e VETTORAZZI, 2009). De acordo com VALENTE e VETTORAZZI (2009), existem os grupos de métodos de Avaliação Multicriterial (MCEM) baseados nas operações matemáticas Booleanas e os baseados na Combinação Linear Ponderada (CLP). O segundo grupo é mais flexível em termos de produção de alternativas, por considerar regras de combinação compensatórias. Existem, contudo, algumas limitações associadas ao uso deste método no processo decisório.

A identificação das variáveis críticas do projeto faz-se deixando flutuar as variáveis do projeto segundo uma dada variação percentual, porém, só se deve fazer

flutuar uma variável de cada vez, mantendo os outros parâmetros constantes. Nesses casos, deve ser feita pelo menos uma avaliação qualitativa dos riscos para apoiar os resultados da análise de sensibilidade (MYERS *et al.*, 2009).

### **Análise de Experimentos Fatoriais Fracionários**

Experimentos fatoriais são todas as combinações possíveis dos diversos níveis das variáveis independentes, com a meta de identificar as razões da variável de saída. Os níveis de um fator satisfazem aos valores que este fator pode admitir durante a experimentação. A principal vantagem do método é que permite o estudo dos efeitos principais e o efeito da interação entre os fatores. Porém, como principal desvantagem, mostra que o número de tratamentos, dado como a combinação dos fatores envolvidos cresce de forma exponencial à medida que o número de fatores é aumentado.

O emprego de técnicas de planejamento e análise de experimentos fatoriais admite a estimativa dos resultados dessa transformação simultânea, através da decisão dos efeitos principais e dos efeitos de interação entre os fatores. Há interação entre dois ou mais fatores de um experimento se o efeito da variação de um fator depende dos níveis em que são analisados os outros fatores (MONTGOMERY, 1997 apud SANTANNA-GRECO e FABBRI, 2003). Por isso, a interação entre os fatores  $A$  e  $B$  mede o erro cometido estimando-se o efeito principal apenas de  $A$ , como se esta fosse uma variável independente de  $B$  (BOX e DRPAER, 2007).

O emprego do fracionamento de experimentos admite que as respostas sejam alcançadas com apenas uma fração do experimento, explorando-se a redundância existente quando são considerados muitos fatores em um experimento. Essa redundância acarreta em implicações desprezíveis, tanto principais como de interação entre os fatores. Quando são introduzidos no experimento fatores que não possuem influência na variável de resposta, os efeitos desprezíveis aparecem (BOX e DRPAER, 2007)

Os experimentos fatoriais fracionários, conhecidos como fatoriais incompletos, fundamenta-se na exploração dessa redundância, fazendo uso do confundimento (“*confounding*”) com a finalidade de diminuir o número de ensaios em um experimento. Nesse sistema, as variáveis de entrada encontram-se conectados,

podendo realizar uma fração do experimento, por isso que as interações de alta ordem podem ser desconsideradas (SANTANNA-GRECO e FABBRI, 2003).

Um caso particular do planejamento de experimentos fatoriais considera todos os fatores em apenas dois níveis, podendo indicar dois valores numéricos para fatores quantitativos ou duas possibilidades de escolha, para fatores qualitativos (SANTANNA-GRECO e FABBRI, 2003). Sendo  $n$  o número de fatores, o número de combinações ou condições experimentais será  $2^n$ .

Em algumas situações ocorre a necessidade de se introduzir em um experimento fatores quantitativos e qualitativos, e além disso há a possibilidade dos fatores qualitativos possuírem três ou quatro níveis diferentes. Experimentos onde os fatores não ocorrem todos no mesmo nível são denominados experimentos fatoriais assimétricos. A análise de experimentos com fatores em níveis variados possam ser realizados, convém adaptar-se os fatores com mais de dois níveis de variação em planejamentos fatoriais ( $2^n$ ). Com esse desígnio, emprega-se o artifício de transformação de fatores com três ou quatro níveis em dois fatores com dois níveis de variação (MONTGOMERY, 1997 apud SANTANNA-GRECO e FABBRI, 2003)).

## 4.1 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Para encontrar a proporção original dos 3 (três) componentes, os dados foram transformados usando a Equação 5.

$$x_C = \frac{x_n - x}{x_P} \quad (5)$$

onde:

$x_C$  = variáveis codificadas;

$x_N$  = variáveis naturais;

$x$  = média do intervalo, e

$x_P$  = tamanho do passo.

Admitindo-se que a superfície de resposta na região investigada foi uma função linear dos fatores, foi portanto estimada pela Equação 6.

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + e \quad (6)$$

Caso o modelo linear não seja capaz de localizar o ponto ou região ótima, a representação do ajuste dos valores de resposta em termos de falso-componente será verificado através da Equação 7.

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + e \quad (7)$$

Após a definição das variáveis e da análise de MSR, a temperatura inicial, a umidade relativa inicial e a umidade relativa final, fatores mais importante para a estimativa dos parâmetros do Programa de Secagem foram calculadas.

Os gráficos da superfície de resposta e o modelo matemático da temperatura inicial e temperatura final foram obtidos através do programa estatístico R versão 2.14.0.

## 4.2 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para o desenvolvimento do experimento procurou-se utilizar uma espécie com densidade entre média a alta, visto que a finalidade precípua é a de se conhecer o processo de secagem de madeiras amazônicas, além do ajuste e conhecimento do forno de micro-ondas. Para isso, a espécie utilizada, tanto na Etapa de Teste quanto na Etapa do Experimento foi a madeira de Louro - preto (Lauraceae - *Nectandra cuspidata* Nees e Mart) proveniente da Indústria de Pisos da Amazônia, localizada no Município de Iranduba - Am.

Em função da não existência de informação em relação a temperatura inicial de secagem do Louro - preto, utilizou-se para este experimento, informações do Louro - vermelho, que também é da família das Lauraceae. Segundo JANKOWSKY *et al.* (1990), a temperatura inicial do Louro - vermelho (*Nectandra rubra* (Mez)C.K. Allen) é de 50 °C para peças até 2,5 cm de espessura e 40 °C para peças acima de 4,0 cm. Porém, nesta etapa de teste será utilizada a temperatura de 45 °C, com a finalidade precípua de analisar o comportamento do Louro - preto.

## A Espécie Florestal

A espécie florestal escolhida foi o Louro – preto. O critério de escolha foi à facilidade na obtenção de um conjunto de amostras para a experimentação e a pouca informação sobre o comportamento da secagem da madeira de Louro - preto, quer ao ar ou em estufa<sup>2</sup>. Apresenta densidade básica aproximadamente de 0,44 - 0,52 g/cm (MORAES, 2005), retração tangencial de 9,9% e radial de 3,8% e índice T/R de 2,61, e recebe diversos nomes vulgares, tais como: Canela - preta, Canela - ferrugem, Louro - puxuri, entre outros. A espécie foi escolhida em função de suas características de densidade e permeabilidade<sup>2</sup>, pois essas características permitem fazer uma projeção quanto a secagem, isto é, quanto mais permeável for a madeira, teoricamente mais rápida será sua secagem. Além disso, a espécie<sup>2</sup> pode ser utilizada para móveis comuns, folhas faqueadas decorativas, rodapés, treliças, tábuas em geral, venezianas, assoalhos, construção naval e cutelaria, caixotaria para gênero alimentício, escultura, forro e pequenos brinquedos, cabides, etc.

Foram obtidas tábuas nas dimensões 2,5 x 25,0 x 95 cm, sendo transportadas para o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA onde foram aparelhadas e preparadas para a secagem. O corte das tábuas foi no sentido tangencial da peça devido aos altos valores na perda de massa de água por unidade de tempo e em função desse tipo de corte realçar os defeitos que possam ocorrer durante a secagem (BRASIL, 1981). Portanto, a quantificação de possíveis defeitos permite avaliar o nível de dificuldade na secagem, levando a encontrar os melhores parâmetros para a determinação do programa de secagem.

## Sistema de Secagem

O presente estudo foi realizado com um forno de micro-ondas para secar madeiras, da marca Easydry Mikrowellen - Holzrockner, modelo ED 3 / ED 4, com 0,7 m<sup>3</sup> de madeira empilhada, fabricado com tecnologia alemã pela Wv. M. Gobler, especialmente para o INCT - Madeiras da Amazônia do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA (Figura 10). Portanto, esse processo que ocorre nas moléculas da água, se repete por  $2,45 \times 10^9$  (2.450.000.000) vezes por segundo, aquecendo a madeira no interior do forno, provocando então a sua secagem. É importante lembrar que a

---

<sup>2</sup> Disponível em: [http://www.mohr.com.br/madeiras.htm#Louro preto](http://www.mohr.com.br/madeiras.htm#Louro%20preto). Acessado em 12.12.2011

micro-ondas penetra na madeira e o aquecimento ocorre do interior para a superfície, diferente do processo convencional.



Figura 10. Forno de micro-ondas Easydry utilizado no experimento.

A temperatura elevada contribui para aumentar a velocidade de retirada da umidade, tanto para a movimentação da água por difusão, quanto para a circulação de água capilar (PINHEIRO, 2013), entretanto pode ocasionar defeitos. Outra propriedade física muito importante é a retração das dimensões da madeira, que ocorre abaixo do PSF (OLIVEIRA *et al.*, 2010), pois ocorrem de maneira diferenciada de acordo com os planos anatômicos da madeira (TRIANOSKI, 2012). Assim sendo, utilizou-se as temperaturas de 40 °C, 45 °C e 50 °C com a finalidade de verificar qual temperatura é melhor caracterizada como a temperatura inicial de secagem por micro-ondas do Louro - preto. Como a temperatura é responsável pelo fornecimento de energia para evaporar a água da madeira, a função da umidade relativa do ambiente de secagem é a de ter a capacidade em receber o vapor d'água que é cedida pela madeira. Assim, a rapidez de secagem depende da umidade relativa do ar, pois quanto menor a umidade relativa do ar, maior a quantidade de água que o ar pode conter (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985). As umidades relativas iniciais de 70%, 80% e 90% testadas foram escolhidas em função de que no início da secagem é preferível utilizar umidade alta para favorecer a retirada da água da madeira de forma mais vagarosa, assim contribuindo para a não formação de defeitos, sendo porém, reduzidas quando as tensões reverterem. Para se chegar a uma secagem adequada do Louro - preto foram testadas as umidades relativas finais de 45%, 55% e 65% visando a secagem da madeira até um teor pré-determinado, com o mínimo de defeitos.

## Fluxograma de Secagem

Apesar da umidade de equilíbrio da região oscilar em torno dos 18%, esta pesquisa avaliou a umidade final de 10% da madeira seca por micro-ondas, pois segundo BROTERO (1941) esta é a umidade da madeira utilizada em ambientes internos.

A secagem por micro-ondas é um processo novo em termos de Brasil, e como tal não há nenhuma metodologia para determinação de Programas de Secagem e nem para a classificação dos defeitos. Em função da não existência de metodologias para a determinação das variáveis da secagem de madeiras amazônicas por micro-ondas, levou-se a estabelecer um fluxograma de ensaios conforme a Figura 11. Nesta etapa da pesquisa foram testadas todas as combinações com as variáveis para a determinação da temperatura inicial e umidades relativas inicial e final. Assim, as combinações geraram 27 experimentos com 6 (seis) amostras, resultando em 162 ensaios.

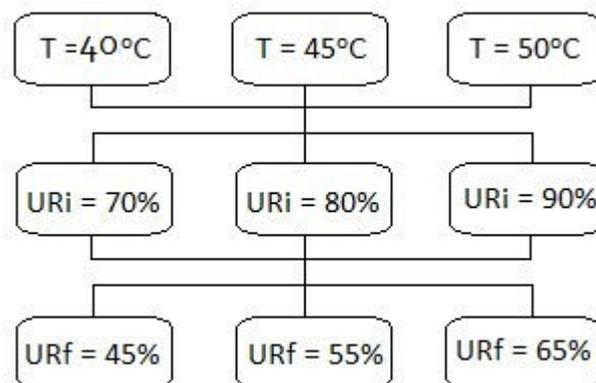


Figura 11. Fluxograma de secagem por micro-ondas.

De cada tábua foram retiradas amostras para a determinação de umidade inicial através do método de dupla pesagem. Assim como, por ocasião do término do processo de secagem, as amostras foram secas pelo mesmo método com a finalidade de se determinar as umidades finais. O cálculo para determinação da umidade foi realizado pela Equação 8.

$$TU\% = \frac{(P_i - P_s)}{P_s} \times 100 \quad (8)$$

onde:

TU% = Teor de umidade;

$P_i$  = Peso inicial;

$P_s$  = Peso seco.

A não existência, também, de uma classificação e quantificação dos defeitos, bem como a classificação do tempo de secagem por micro-ondas levou-se a fazer a seguinte proposição de avaliação das tábuas, conforme os critérios das Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Critério utilizado na classificação de tendência do aparecimento de defeitos (rachas, empenos, colapso e endurecimento superficial).

Presença do defeito (%)	Classe	Tendência
0 – 15	1	Ausente
16 – 31	2	Pequena
32 – 47	3	Moderadamente pequena
48 - 63	4	Média
64 - 79	5	Moderadamente grande
80 – 100	6	Grande

Tabela 2. Critério utilizado para classificar o tempo de secagem por micro-ondas, para tábuas de 2,5 cm de espessura.

Tempo de secagem (h)	Classificação
Até 12,0	Muito rápida
12,1 – 24,0	Rápida
24,1 – 36,0	Moderadamente rápida
36,1 – 48,0	Moderadamente lenta
48,1 – 60,0	Lenta
Acima de 60,0	Muito lenta

Após a secagem por micro-ondas os defeitos foram avaliados com base na classificação proposta na Tabela 3, adaptada de BRANDÃO (1989). A determinação

do colapso foi realizada pela diferença das dimensões que foram aferidas com paquímetro com precisão de  $0,01 \mu\text{m}$ , antes e depois da secagem (Figura 12).

Tabela 3. Critérios utilizados na classificação dos defeitos oriundos da secagem.

Grau	1 - ausente	2 - pequeno	3 - Moderadamente pequena	4 - Média	5 - Moderadamente grande	6 - grande
Racha de Topo	Sem defeito	Até metade da espessura. Largura até 0,8mm	Mais da metade da espessura. Largura até 0,8mm	Até metade da espessura. Largura 0,8 a 1,5mm	Mais da metade da espessura. Largura 0,8 a 1,5mm	Mais da metade da espessura. Largura 1,5 a 3,0mm
Racha superficial	Sem defeito	25% comprimento com até 0,5mm	50% do comprimento com até 1,0mm	75% do comprimento com até 1,5mm	75% do comprimento com até 2,0mm	75% do comprimento maior que 2,0mm
Racha interna	Sem defeito	Altura até 5mm. Largura até 1mm	Altura até 5mm. Largura de 1 a 2mm	Altura até 4mm. Largura de 2 a 3mm	Altura até 5mm. Largura de 3 a 4mm	Altura até 5mm. Largura > 4mm
Colapso (A-B)	Sem defeito	Até 0,5mm	De 0,5 a 1,0mm	De 1,0 a 1,5mm	De 1,5 a 2,0mm	Maior que 2,0mm

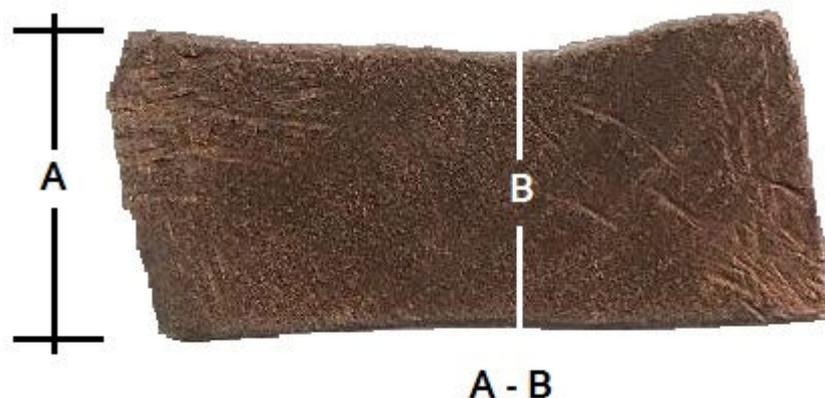


Figura 12. Esquema demonstrativo da medição do colapso.

Fonte: Arquivo do autor.

### 4.3 PROGRAMAS DE SECAGEM CONVENCIONAL

Para a madeira secar de maneira rápida em condições severas e sem defeito é necessário a utilização de um Programas de Secagem. A condição de secagem quando é realizada com altas temperaturas do bulbo seco e uma ampla depressão do bulbo úmido tende a ocasionar uma condição severa de secagem, pois gera baixa umidade relativa. Várias propriedades da madeira estão associadas à severidade de um programa de secagem, tais como densidade básica, contração e propriedades mecânicas. Densidade é a propriedade mais utilizada e analisada pela literatura.

Um programa de secagem convencional consiste na determinação de uma temperatura inicial do bulbo seco e uma depressão do bulbo úmido com a finalidade de secar a madeira desde um teor de umidade verde até o nível de umidade pré – determinada a ser alcançada (MENDES *et al.*, 1998). Durante o último estágio do programa de secagem, os aumentos são feitos na temperatura do bulbo seco e na depressão do bulbo úmido. Em um forno de micro-ondas a determinação da temperatura é igual a convencional, porém a temperatura permanece constante do início ao fim da secagem.

O problema de elaboração de programas de secagem para madeiras tem obrigado a busca de uma metodologia para atender a esse fim. Um Programa de Secagem típico, segundo BATISTA *et al.* (2012), apresenta três fases distintas: Aquecimento, Secagem propriamente dita e Equalização (Uniformização) e Condicionamento.

## **Aquecimento**

Ao iniciar o processo de aquecimento é importante que seja realizado o mais rápido possível. A atmosfera no ambiente necessita de vapor, caso utilize-se secagem convencional, ou mesmo de água líquida quando se usa secagem por aquecimento do ar, para elevar a umidade relativa. Durante o processo de aquecimento é importante conferir sempre o psicrômetro para verificar a movimentação da temperatura do bulbo seco e do bulbo úmido. Na secagem por micro-ondas, o próprio forno, em função da umidade inicial e o peso da madeira é quem determina o período de aquecimento.

Quando a diferença entre a temperatura do bulbo seco e a temperatura do bulbo úmido é mínima, dá-se início a fase de aquecimento. Em geral, adota-se o método de HILDEBRAND (1970), que aconselha um período de 1 hora por um centímetro de espessura das peças.

## **Secagem propriamente dita**

Durante a fase de secagem propriamente dita, um gradiente de umidade pequeno deve ser mantido, pois um alto gradiente resultaria em tensões internas, o que fatalmente provocaria em defeitos na madeira.

Enquanto a água livre não for totalmente retirada, a temperatura inicial do processo de secagem deve ser mantida. Cada madeira possui seu padrão de temperatura inicial, mas em geral madeiras com maiores espessuras utilizam-se temperaturas mais baixas. Segundo GALVÃO e JANKOWSKY (1985) ressaltam que as peças de madeira em secagem, com umidade média de 30% apresentam valores mais elevados no seu interior devido ao gradiente de umidade que se estabelece durante o processo. Os Programas de Secagem preveem uma margem de segurança em função desse fenômeno. Ao se estabelecer as condições de secagem, ou seja, a informação da temperatura inicial, as umidades relativas inicial e final e a umidade final da madeira, o forno de micro-ondas programa o período de aquecimento, o período de secagem e o período de resfriamento.

## **Equalização (Uniformização) e Condicionamento**

Quando a madeira úmida seca existe uma variação do teor de umidade dentro e entre tábuas de cada carga no fim da secagem. Esta diferença no teor de umidade pode ser muito grande, devido a diferentes causas tais como o teor de umidade inicial não uniforme, escolha incorreta da amostragem e diferente grau de qualidade da madeira (KORKUT *et al.*, 2013). A equalização e o condicionamento também são conhecidos como “fase de controle de qualidade” da secagem convencional, pois na secagem por micro-ondas é inexistente.

## 5 ETAPA DE TESTE

### Introdução

A secagem de madeiras é uma fase de grande importância na indústria madeireira, pois proporciona vantagens como melhoria das características de trabalhabilidade e redução da movimentação dimensional como da possibilidade de ataque por fungos e insetos. A aplicação prática da secagem por micro-ondas realizada neste pré - experimento foi para verificar que esta tecnologia pode ser utilizada para o aquecimento e secagem da madeira, inclusive na redução do tempo de secagem, pois é rápido e com possibilidade de produzir madeira sem defeito. Apesar disso, existe ainda a necessidade de realização de mais pesquisas sobre a aplicação de micro-ondas na secagem da madeira, principalmente para as madeiras amazônicas.

### Metodologia

Para a efetivação da Etapa de Teste foi realizada a determinação qualitativa e quantitativa da distribuição de potência dos magnétons com a temperatura (80 °C) além da secagem da madeira de Louro - preto. Em função do secador já vir com 18 (dezoito) espécies programadas, foi utilizado para este teste, o programa de secagem da madeira de Mogno (Aguano), com temperatura inicial de 45 °C, umidade relativa inicial de 85% e umidade relativa final de 45%. Além disso, é uma espécie de densidade média, é madeira nobre e compatível com a espécie a ser testada.

Os papéis foram dispostos dentro da cavidade de forma que apanhasse toda a extensão do forno (secador) em seu comprimento. Em função do papel ter 20 cm de largura, foram colocados 2 tiras, uma na parte da frente e outra atrás. Em outro teste foram colocadas 3 (três) tiras, cobrindo por inteiro o local de empilhamento da madeira. Esse tipo de papel permite a criação de uma imagem escura nas regiões de alta intensidade. O objetivo foi o de identificar os locais de atuação da energia cinética através de pontos queimados (imagem escura) no referido papel. Essa informação é importante devido às micro-ondas carregarem energia que aquecem a molécula polar (água) em função do alinhamento elétrico das ondas. O campo muda a direção de acordo com a frequência, e essa mudança ocasiona um aumento da energia cinética das moléculas e em consequência o aumento da temperatura.

Após a configuração da distribuição dos Magnétons foi realizada a secagem da madeira Louro - preto e foi verificada a distribuição da umidade para verificar se a distribuição da potência dos Magnétons estava de acordo com o sugerido.

O estudo foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com arranjo fatorial, tendo como fatores a duração do tempo de secagem (S1 = 2h25'; S2 = 2h08' e S3 = 2h02'), temperatura fixa de 45 °C. Os dados foram analisados com transformação ( $\sqrt{x}$ ), por análise da variância (ANOVA), pelo teste F e as comparações de médias pelo teste de Tukey, ambas a 5% de significância.

## Resultados e Discussão

A determinação da distribuição de potência dos Magnétons utilizou papel termo sensível (papel de fax), que apresenta em uma determinada temperatura, uma mudança de cor. Neste teste a temperatura de 80 °C foi suficiente para provocar a mudança da cor branca do papel termo sensível para a cor de papel queimado.

A Figura 13 mostra a distribuição de campo na área total do secador, e como esperado não houve qualquer distribuição de campo uniforme. As amostras de papel termo sensível foram marcadas na parte direita onde ocorreu a maior intensidade.

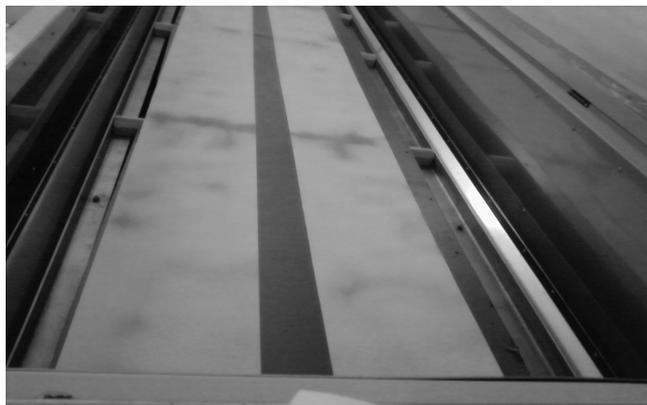


Figura 13. Distribuição de campo na câmara de secagem por micro-ondas.

Em um segundo teste, após ajustar o terceiro magnéton em 5% (95% de potência), comprovou-se ainda que a distribuição no interior da câmara continuava não uniforme. Ajustou-se então o magnéton para 10% (90% de potência), verificando-se não haver mais a formação de marcas no papel, conforme Figura 14.



Figura 14. Distribuição de campo após ajuste do terceiro magnéton em 10% (90% de potência).

A visualização do campo com maior incidência de potência só foi possível devido a utilização do método de papel termo - sensível, que é adequado para detectar possíveis áreas propensas a queimar as amostras sólidas. Caso esta área não fosse detectada, ocasionaria um efeito desfavorável de queima localizada da madeira, tornando problemática a colocação das amostras no secador.

Após a determinação da incidência de potência, foi realizada uma secagem para verificar se além da distribuição dos magnétons estava de acordo com o ajuste e o comportamento da madeira Louro - preto diante do programa utilizado. Verificou-se que a distribuição de umidade da madeira foi praticamente igual em todo o forno, conforme pode ser verificado na Tabela 4, e pode se constatar que a potência dos magnétons esteve de acordo com o teste efetuado.

Tabela 4. Resultado da distribuição da umidade em função da localização no forno.

Magnétons	Umidade Média
Esquerda	13,81
Meio	14,12
Direita	14,70
Média Geral	14,21
Amplitude	0,88

Apesar da umidade final ficar acima da desejada, contudo existe uma distribuição equânime ao longo do secador. Verifica-se que a carga apresentou uma amplitude de variação, entre a média mais seca e a média da mais úmida, de apenas 0,88%, denotando que foi uma secagem praticamente uniforme.

O programa para esta secagem, o de mogno, utilizado por apresentar semelhanças a madeira de Louro - preto, foi empregado com a finalidade de proporcionar uma redução do tempo de secagem quando comparado a secagem convencional. Esta decisão foi tomada em função da não existência de informações precisas sobre a secagem do Louro - preto.

Todas as variáveis do processo após serem introduzidas no painel de controle do forno de micro - ondas, o tempo de aquecimento, o tempo de secagem e o tempo de resfriamento são informados através do painel de controle. O esquema de tratamento de secagem, assim como o teor de umidade inicial (TU<sub>i</sub>), o teor de umidade final (TU<sub>f</sub>) e o tempo de secagem (ts) podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros do Resultado da secagem por micro-ondas da madeira de Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Madeira	Dimensão (cm)	Db (g/cm <sup>3</sup> )	Freq (GHz)	Secagem	TU <sub>i</sub> Média (%)	TU <sub>f</sub> Média (%)	ts final (hs)
Louro - preto	2,5x25x95	0,44	2,45	S1	48,87	13,99	2h25'
				S2	29,45	14,00	2h08'
				S3	20,68	14,62	2h02'

Db = Densidade básica; Freq = Frequência; U<sub>i</sub> = Umidade inicial; U<sub>f</sub> = Umidade final e, ts = tempo de secagem.

Verifica-se na Tabela 5 que a umidade final real foi de aproximadamente 14%, enquanto a umidade final esperada e programada foi de 10%. Provavelmente, a umidade inicial foi maior do que a real em função do aparelho elétrico medidor de umidade utilizar sensores capacitivos não agressivos.

Como o principal objetivo deste teste foi à verificação de defeitos, principalmente do tipo colapso, rachas de superfície, de topo e interna por meio da secagem por micro-ondas, utilizando a mesma temperatura de secagem para um programa de secagem convencional, será apresentado a avaliação e análise dos

resultados obtidos. Como a diferença de retratibilidade para esta espécie é alta, ou seja, a relação T/R (fator anisotrópico) está acima de 1,5, é esperado que os problemas decorrentes da secagem sejam maiores.

Outro problema que pode ocorrer é a mudança de cor devido a ausência de oxigênio durante a secagem. Aparentemente as amostras de Louro - preto não mudaram de cor e este resultado é similar aos encontrados por SEYFARTH *et al.* (2003), por ocasião da secagem do Abeto e Carvalho.

O controle de qualidade efetuado antes da secagem mostrou as tábuas isentas de defeitos. E, após secagem, a análise mostrou que não houve a presença de colapso e racha interna, indicando que provavelmente a ausência do colapso e da racha interna estão relacionados com a utilização do programa empregado considerado suave ou levando a crer que a espécie não possui tendência a formação de tais defeitos.

A Tabela 6 apresenta os valores de umidade (inicial e final) e os valores dos escores dos defeitos analisados, onde se observou que nas secagens efetuadas, houve somente a presença de rachas de superfície e de topo e que a secagem S2 possui maior tendência de racha de superfície. A racha de superfície e de topo não é uma função das tensões de crescimento, pois ocorre em função do movimento entre a direção radial e a direção tangencial através da secagem e é dependente das espécies, porém de intensidades diferentes.

Os resultados oriundos das avaliações dos defeitos de secagem da madeira Louro-preto são analisados com base na Tabela 3, onde é apresentado a classificação dos defeitos de secagem em função do número de tábuas de madeira provenientes das secagens realizadas.

Tabela 6. Valores da umidade inicial e final e escores dos defeitos da madeira de Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Secagem	Ord	Ui	Uf	Col	RS	RT	RI
S1	1a	50.2	14.56	1	1	2	1
	1b	43.3	14.23	1	2	1	1
	1c	46.7	14.24	1	1	2	1
	1d	53.5	13.1	1	3	1	1
	1e	50.8	14.39	1	2	1	1
	1f	48.5	13.08	1	1	1	1
	1g	45.8	14.65	1	1	2	1
	1h	45.2	14.12	1	2	1	1
	1i	48.8	13.19	1	1	1	1
	1j	47.7	14.01	1	3	1	1
	1k	55.7	14.18	1	4	2	1
1l	50.2	14.12	1	1	1	1	
S2	2a	32	15.03	1	2	1	1
	2b	33	14.54	1	4	2	1
	2c	30.3	14.87	1	5	1	1
	2d	31	13.24	1	1	1	1
	2e	29	14.34	1	1	1	1
	2f	28.5	14.18	1	1	2	1
	2g	29	13,00	1	2	1	1
	2h	28	14.09	1	1	1	1
	2i	28.1	13.12	1	3	1	1
	2j	29	13.23	1	5	2	1
	2k	28.5	14.18	1	2	1	1
2l	27	14.14	1	1	1	1	
S3	3a	20.5	14.29	1	1	1	1
	3b	21	14.34	1	4	2	1
	3c	20	15.36	1	3	1	1
	3d	21.5	14.67	1	2	1	1
	3e	20.3	14.12	1	1	2	1
	3f	19.5	15.08	1	1	1	1
	3g	21.5	15.18	1	1	1	1
	3h	18.9	15.10	1	1	2	1
	3i	21	14.19	1	2	1	1
	3j	22	14.60	1	3	1	1
	3k	22.5	14.38	1	1	1	1
3l	19.5	14.15	1	3	2	1	

S1, S2, S3 = Secagem 1, 2 e 3. Ui = Umidade inicial. Uf = Umidade final. Col = Colapso.  
RS = Racha de Superfície. RT = Racha de Topo. RI = Racha Interna.

Observa-se através da análise dos dados da Tabela 8, que a avaliação dos defeitos das secagens realizadas em função das umidades iniciais das amostras e do número de tábuas provenientes de cada secagem, mostraram-se mais propensas a defeitos de racha superficial e de pequena tendência a racha de topo. Por outro lado,

TORGOVNIKOV e VINDEN (2009) esclarecem que dependendo da espécie de madeira, da espessura e do teor de umidade inicial, o processo com energia por micro-ondas é recomendado, porém existe a possibilidade de desenvolvimento de rachas internas e externas.

Considerando (Tabela 7) que as condições de secagem foram iguais verifica-se que a secagem S2 apresentou maior percentual dos defeitos, provavelmente por encontrar-se no Ponto de Saturação das Fibras - PSF, onde começa a contração da madeira, pois não há mais a presença de água livre somente a água impregnando as paredes celulares. Observa-se que as amostras das secagens S1(50%) e S3(50%) atingiram menor percentual dos defeitos de racha de superfície e 33,3% da racha de topo. O maior percentual de racha de superfície foi apresentado pela secagem S2(58,3%), porém com menor tendência ao defeito de racha de topo (25%).

Tabela 7. Avaliação dos defeitos de secagem por micro-ondas para a madeira Louro-preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Defeitos	Experimentos	S1 (45°C)		S2 (45°C)		S3 (45°C)	
	U% Média	48,87		29,45		20,68	
	Critérios	n <sup>o</sup>	%	n <sup>o</sup>	%	n <sup>o</sup>	%
Colapso	1	12	100	12	100	12	100
<b>% Total de Defeito</b>			<b>0</b>		<b>0</b>		<b>0</b>
Racha interna	1	12	100	12	100	12	100
<b>% Total de Defeito</b>			<b>0</b>		<b>0</b>		<b>0</b>
Racha de superfície	1	6	50	5	41,7	6	50
	2	3	25	3	25	3	25
	3	2	16,7	1	8,3	2	16,7
	4	1	8,3	1	8,3	1	8,3
	5	0	0	2	16,7	0	0
<b>% Total de Defeito</b>			<b>50</b>		<b>58,3</b>		<b>50</b>
Racha de topo	1	8	66,7	9	75	8	66,7
	2	4	33,3	3	25	4	33,3
<b>% Total de Defeito</b>			<b>33,3</b>		<b>25</b>		<b>33,3</b>

n<sup>o</sup> = número de peças utilizadas; S1 = Secagem 1; S2 = Secagem 2 e S3 = Secagem 3.

Os defeitos de racha de superfície e de topo não foram significativos, mostrando provavelmente sejam oriundos da própria espécie. Em geral, as secagens efetuadas não mostraram comportamento diferenciado, em função das umidades iniciais, pois todas apresentaram as rachas de superfície e de topo.

Em resumo, o programa de secagem da madeira Louro - preto por micro-ondas iniciou com temperatura de 45 °C (programa do Mogno), e é importante notar que o modo de aquecimento da madeira, no processo por micro-ondas, pode ter contribuído para o resultado da secagem pois a utilização de micro-ondas em folhosas, supera perdas por causa do longo tempo de secagem convencional.

É importante ressaltar que a madeira antes da secagem pode apresentar um acréscimo da taxa de desorção, reduzindo os defeitos de secagem e consequentemente aumentando o seu rendimento. MACHADO (2006) mostra que a secagem por micro-ondas da madeira de carvalho, pode reduzir o estoque total e tempo de processamento para cerca de 12 dias, com reduções concomitantes na manipulação de madeira, estoque e custos operacionais. Apesar de não ter sido abordado neste estudo, mas a redução do tempo de secagem leva a uma redução significativa no consumo de energia, possibilitando a diminuição do tempo de produção.

Um perfil de umidade na madeira foi examinado e verificou-se que a taxa de umidade no interior foi menos elevada do que na superfície, legitimando que o aquecimento começa no interior da madeira.

### **Conclusões da Etapa de Teste**

A secagem da madeira de Louro - preto permite concluir que a micro-ondas pode ser considerada uma secagem muito rápida, pois os processos transcorreram em 2h25', 2h08' e 2h02' conforme Tabela 3. Os magnétons foram configurados para equalizar a distribuição de campo de incidência das micro-ondas, constatando que a distribuição da potência dos magnétons estava de acordo com a sugestão proposta, pois as umidades finais da madeira, apesar de estarem acima da desejada, não foram verificadas grandes diferenças entre si. A madeira de Louro - preto mostrou média tendência a formação de racha de superfície e moderadamente pequena a racha de topo, porém não apresentou colapso e nem racha interna e também não descoloriu a madeira. O equipamento permite um controle visual através do painel de controle, assim como permite mudança no programa de secagem por ocasião da secagem.

## 6 ETAPA DO EXPERIMENTO

### 6.1 ANÁLISE DESCRITIVA

Considerando que a secagem da madeira é um processo pelo qual tende-se a reduzir o conteúdo de umidade no menor tempo e com a menor quantidade ou sem defeito, julga-se como fator definitivo o fato das madeiras reagirem de forma diferente a formação do defeito, mesmo que tenham velocidades de secagens parecidas.

Tabela 8. Valores médios da Umidade inicial, Umidade final e Tempo de secagem por Micro-ondas do Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Variáveis	Média + erro padrão	Mínimos	Máximos	Amplitude
Umidade Inicial(%)	24,10 ± 4,86	16,30	35,30	19,0
Umidade final(%)	10,61 ± 3,30	6,30	20,1	13,8
Tempo secagem(h)	1,29 ± 0,1822	1,03	1,72	0,69

Assim, através da análise geral das variáveis do processo (Tabela 8), verifica-se que a umidade inicial média obtida de todas as secagens das madeiras de Louro - preto foi de 24,1% e a umidade final em torno dos 10,61%, secas em média 1h29, secagem considerada muito rápida, conforme Tabela 2. Nota-se que as temperaturas utilizadas na secagem por micro-ondas alcançaram o objetivo de secar a madeira até 10% de umidade final programada.

Observa-se na Tabela 9 que as temperaturas de secagem efetuadas com menor tendência a formação de defeitos foram aparentemente as temperaturas de 40 °C e 45 °C. Porém, nota-se que a temperatura de 45 °C mostrou tendência de pequena a grande na formação de rachaduras de topo e superfície, conforme Tabela 1 e Tabela 3. Ao se analisar a temperatura de 50 °C verificou-se que, praticamente todas as peças apresentaram algum tipo de defeito, e por vezes defeitos associados. A série de secagem com Temperatura inicial de 45 °C apresentou tendência a formação de defeito de pequeno a grande (Tabela 1). Contudo, ao se analisar a Tabela em Anexo, verifica-se que a secagem 45-70-65 foi a que apresentou todas as madeiras com rachadura de topo ou rachadura de superfície, enquanto a secagem 45-90-45 mostrou peças com micro Rachaduras de topo.

Tabela 9. Resultados de Umidade inicial e final, secagem e defeitos para os programas de secagens por micro-ondas utilizados para a madeira de Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Programa	Umidade (%)		Secagem (h)		Classificação defeito			Grau do defeito		
	Inicial	Final	Tempo	Média	Tipo	Critério	Tendência	Quant	G	Tendência
40-70-45	30.8	14.1	1.49		SEM	1	Ausente	0	1	Ausente
40-70-55	27.3	14.0	1.53		SEM	1	Ausente	0	1	Ausente
40-70-65	23.6	12.6	1.32	1.44	RT	3	mod.peq	2	2	Pequeno
40-80-45	35.3	14.8	1.72		SEM	1	Ausente	0	1	Ausente
40-80-55	22.6	11.5	1.32		RT/RS	3	mod.peq	2	1	Ausente
40-80-65	22.4	11.0	1.30	1.44	RT	2	Pequena	1	2	Pequeno
40-90-45	17.7	11.2	1.17		SEM	1	Ausente	0	1	Ausente
40-90-55	19.1	11.6	1.20		SEM	1	Ausente	0	1	Ausente
40-90-65	17.2	10.6	1.10	1.17	RT/RS	3	mod.peq	2	2	Pequeno
45-70-45	21.2	16.5	1.23		SEM	1	Ausente	0	1	Ausente
45-70-55	22.8	8.3	1.21		SEM	1	Ausente	0	1	Ausente
45-70-65	21.0	6.3	1.20	1.21	RT/RS	4	Média	3	2	Pequeno
45-80-45	24.0	7.8	1.07		SEM	1	Ausente	0	1	Ausente
45-80-55	21.3	7.8	1.05		RT/RS	2	Pequena	1	5	mod.gran
45-80-65	21.0	6.6	1.03	1.05	SEM	1	Ausente	0	1	Ausente
45-90-45	16.3	11.5	1.12		RT	2	Pequena	1	3	mod.peq
45-90-55	23.9	8.8	1.24		RT/RS	6	Grande	6	2	Pequeno
45-90-65	25.9	8.8	1.27	1.21	SEM	1	Ausente	0	1	Ausente
50-70-45	22.2	7.8	1.23		SEM	1	Ausente	0	1	Ausente
50-70-55	21.5	7.8	1.22		RT/RS/Emp	4	Média	3	3	mod.peq
50-70-65	25.8	12.1	1.31	1.25	RT/Emp	3	mod.peq	2	2	Pequeno
50-80-45	27.1	8.1	1.29		Emp	4	Média	3	2	Pequeno
50-80-55	21.6	7.6	1.24		RT/Emp	3	mod.peq	2	3	mod.peq
50-80-65	22.7	6.9	1.27	1.26	Emp	3	mod.peq	2	2	Pequeno
50-90-45	33.3	20.1	1.63		RT/RS	3	mod.peq	2	5	mod.gran
50-90-55	29.9	10.5	1.47		RT/RS	5	mod.gran	4	3	mod.peq
50-90-65	32.2	11.8	1.66	1.59	RT/RS	4	Média	3	3	mod.peq

Ti-Uri-Urf = Temperatura - Umidade relativa Inicial - Umidade relativa Final; SEM = Não apresentou defeito; RT = Rachadura de topo; RS = Rachadura de superfície; Emp = empenamento; Quant = Quantidade de peças com defeito; G = Grau do defeito.

Ao se analisar a Umidade relativa inicial (Tabela 9), verificou-se que as umidades pesquisadas (70%, 80%, 90%) apresentaram o mesmo percentual de amostras sem defeitos. Contudo, as umidades iniciais de 80% e 90% mostraram defeitos considerados pequenos a moderadamente pequenos, de acordo com a Tabela 1. Porém, quando se analisou a Umidade relativa final (45%, 55%, 65%), na mesma Tabela, verificou-se que a Umidade final de 45% e 55% apesar de apresentarem muitas peças sem defeitos, porém mostraram defeitos de racha de topo e superfície classificados como moderadamente grandes conforme Tabela 3. Apesar dessa tendência, as secagens

com Umidade relativa final de 45% e 55%, puderam ser consideradas boas para a secagem do Louro - preto. Por outro lado, a Umidade final de 65% mostrou uma quantidade muito alta de peças com defeito, classificadas de pequena a média tendência.

As secagens com temperaturas a 50 °C mostraram-se totalmente ineficazes para os padrões de qualidade com madeira seca e sem defeito. Apenas a secagem 50-70-45 não apresentou defeito. Em contra partida, todas as outras secagens apresentaram defeitos classificados de médios a moderados, segundo critérios da Tabela 1 e de pequeno a moderadamente grande em relação ao grau de defeito de acordo com a Tabela 4, apesar de apresentarem umidade inicial abaixo do Ponto de Saturação das Fibras - PSF (30%).

Quanto a qualidade da madeira no término do processo de secagem por micro-ondas, foi possível verificar que as secagens efetuadas na temperatura de 50 °C, apresentaram em todos os seus arranjos, o maior número de peças de madeira com defeito, os quais em alguns casos, foi considerado moderadamente grande, de acordo com a Tabela 1. Porém, foi realizada uma análise mais detalhada para se comprovar qual programa de secagem apresentou menor quantidade de defeitos e em menor tempo possível.

## **6.2 MÉTODO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA**

Em muitas ocasiões existe o interesse em medir as analogias existentes entre os principais fatores que compõem um processo e uma variável resposta de mérito. Nestas circunstâncias, tem-se como alvo, produzir qual é a categoria de operação do processo que induzirá à aquisição de um valor ótimo para a variável resposta. Com a finalidade de verificar a influência dos fatores Temperatura inicial ( $T_i$ ), Umidade relativa inicial ( $U_{ri}$ ) e Umidade relativa final ( $U_{rf}$ ) na variável Umidade final da madeira ( $U_{fm}$ ), para a produção de madeira isenta de defeitos e com a umidade final da madeira fixada em 10%, foi elaborado um planejamento experimental fatorial  $3^3$ .

Foi estimado o modelo de primeira ordem, o qual apresentou falta de ajuste ( $p$ -valor  $< 0,0001$ ), o mesmo acontecendo com o modelo de 2ª ordem ( $p$ -valor  $< 0,0001$ ), conforme ANOVA apresentada na Tabela 10. Este modelo não atendeu as suposições de normalidade e homocedasticidade. Entretanto, usando a transformação

logarítmica, estas suposições ficam satisfeitas mas, continua a falta de ajuste (p-valor < 0,0001).

Na Tabela 10 verifica-se o quadro da ANOVA (Análise de Variância) onde são mostrados os valores para a análise do modelo proposto e quais as variáveis que foram significativas a um nível de 5%. O modelo não é útil, pois a análise estatística no planejamento identificou a total ausência de interação, e em função desse fator, apresentou falta de ajuste significativa (p-valor = 2,2e-16), talvez por não satisfazer as suposições de normalidade e homocedasticidade. A verificação da suposição de normalidade dos resíduos é essencial para prosseguir nas análises do modelo, enquanto a outra suposição importante do modelo, a homocedasticidade, é a de que os resíduos possuam variância constante.

Tabela 10: Resultados da ANOVA para o modelo dos dados.

<b>Causa de Variação</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrados Médios</b>	<b>F calculado</b>	<b>P- valor</b>
<b>Linear (TI, URI, URF)</b>	3	478,94	159,648	29,506	4,323e-15
<b>Interação (TI, URI, URF)</b>	3	333,60	111,20	20,552	3,118e-11
<b>Quadrático (TI, URI, URF)</b>	3	326,56	108,854	20,118	4,924e-11
<b>Resíduo</b>	152	822,44	5,411		
<b>Falta de Ajuste</b>	17	574,67	33,804	18,418	< 2,2e-16
<b>Erro Puro</b>	135	247,77	1,835		

As condições do experimento foram controladas desde o manuseio das madeiras e preparo do forno de micro-ondas, até a execução das secagens. Isso indica que a maior parte dos efeitos alcançados foi produto dos fatores aleatórios intrínsecos as secagens realizadas, e que o modelo não explicou adequadamente a variação dos resultados. Nenhum dos modelos estimados foi adequado para explicar a variabilidade da umidade final da madeira, por isso a determinação da temperatura de secagem não foi possível ser otimizada. Ainda assim, foi procedida a análise dos resultados obtidos. A construção do gráfico da Superfície de Resposta em função da Temperatura inicial, Umidade relativa inicial e Umidade relativa final sobre a resposta Umidade final da madeira, fixando os valores de Uri em 80%, Urf em 55% e Ti em 45 °C, conforme Figuras 15a, b e c.

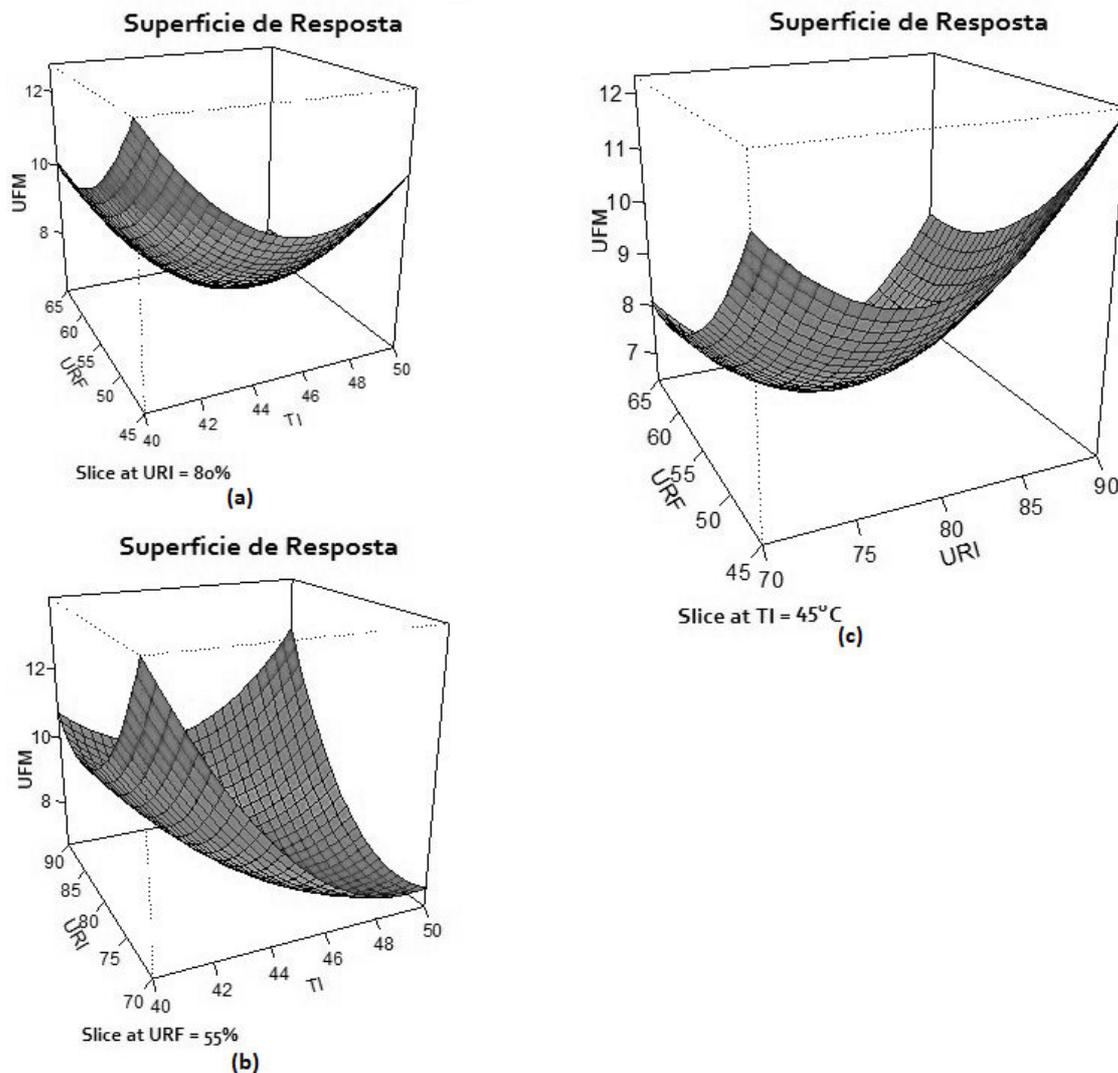


Figura 15. Método de Superfície de Resposta da madeira Louro preto: a) Umidade final da madeira em relação a  $T_i(^{\circ}\text{C})$  e  $U_{rf}(\%)$ , fixado  $U_{ri}$  de 80%; b) Umidade final da madeira em relação a  $T_i(^{\circ}\text{C})$  e  $U_{ri}(\%)$ , fixado  $U_{rf}$  de 55%, e c) Umidade final da madeira em relação a  $U_{ri}(\%)$  e  $U_{rf}(\%)$  fixado  $T_i$  de 45  $^{\circ}\text{C}$ .

O coeficiente de determinação  $R^2$  representa apenas 56% da variação dos dados, verificando-se neste método que os parâmetros  $T_i$ ,  $U_{ri}$  e  $U_{rf}$  foram os que mais contribuíram para a secagem do Louro - preto. Entretanto, a não contribuição para o resultado dos 3 (três) componentes ( $T_i$ ,  $U_{ri}$  e  $U_{rf}$ ) podem ter sido influenciados pela umidade inicial da madeira e pelo pouco conhecimento da secagem por micro-ondas, por isso o resultado deve ser interpretado com cautela. Contudo, tornou-se difícil determinar o ponto ótimo em função da análise do Método de Superfície de Resposta não ter homocedasticidade e normalidade e ter falta de ajuste.

Diferentes fatores, como carência de informações sobre a secagem do Louro - preto e pouco conhecimento da secagem por micro-ondas de espécies amazônicas podem ter interferido na pesquisa, assim sendo o resultado deve ser explicado com prudência.

Como não foi possível extrair um resultado positivo através da análise de MSR, então pode-se realizar uma discretização dos pontos do modelo (PEIXOTO, 2013), ou seja, deverá ser obtido um conjunto finito de representações do sistema, dada uma Temperatura inicial ( $T_i$ ) e Umidade relativa inicial ( $U_{ri}$ ) e Umidade relativa final ( $U_{rf}$ ) escolhidas. Para representar este conjunto gerado, podem ser utilizados regiões de clock e gráficos de amostragem (SOUSA, 2013; SILVEIRA *et al.*, 2013).

Porém, ainda existe a probabilidade de determinação dos valores ótimos caso seja realizado uma Análise de Sensibilidade ou uma Análise de Experimentos Fatoriais Fracionários. A Análise de Sensibilidade é importante na Análise de Decisão, pois é empregada para tomar as melhores decisões, decidir quais dados estimados devem ser refinados antes de tomar uma decisão e, concentrar-se nos elementos críticos durante a implementação (BOX e DRAPER, 2007). A outra análise, de Experimentos Fatoriais admite que os elementos esperados sejam alcançados realizando-se somente uma fração do experimento total, com apoio na redundância existente quando os fatores são introduzidos. Por meio da aplicação da técnica citada, as condições experimentais indispensáveis à aquisição da resposta almejada pode ser diminuída, fazendo-se uso do sistema de acoplamento de efeitos, que é baseado na importância de que interações de alta ordem podem ser desconsideradas (MYERS *et al.*, 2009).

### **6.3 COMPARAÇÕES PELA ANÁLISE DE TESTES NÃO PARAMÉTRICOS**

Em função dos modelos estudados não apresentarem normalidade e nem homocedasticidade, foi utilizada a aplicação de testes não paramétricos, como o Teste de Kruskal - Wallis e o Teste de Fisher, com a finalidade de determinar a melhor temperatura inicial e as umidades relativas inicial e final.

## Teste de Kruskal - Wallis

O Teste de Kruskal - Wallis foi aplicado para testar hipóteses de igualdade no que se refere a localização para duas ou mais de duas amostras. Neste caso foi atribuída as variáveis do processo de secagem de madeiras por micro-ondas, com 2 (dois) resultados, defeitos e umidade final da madeira.

As seguintes hipóteses foram arguidas ao se aplicar o teste de Kruskal - Wallis:

$H_0$  = Não houve diferença de umidade da madeira de Louro - preto para cada Temperatura inicial.

$H_1$  = Houve diferença de umidade da madeira de Louro - preto para cada Temperatura inicial.

São apresentadas as Tabelas com o teste de Kruskal - Wallis para as 3 (três) variáveis do processo de secagem por micro-ondas da madeira de Louro - preto.

Tabela 11. Teste de Kruskal-Wallis para a Temperatura inicial da madeira de Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Variáveis	Temperatura inicial (°C)			P-Valor
	40	45	50	
<b>U% inicial da madeira</b>	23,99 ± 6,53	21,94 ± 3,32	25,77 ± 5,41	0,0234
<b>U% final da madeira</b>	12,37 ± 1,94	9,14 ± 3,17	9,86 ± 4,16	< 0,00001
<b>Diferença</b>	2,37 ± 1,94	-0,86 ± 3,17	-0,13 ± 4,16	< 0,00001
<b>Tempo de secagem</b>	1,35 ± 0,24	1,16 ± 0,09	1,37 ± 0,20	< 0,00001
<b>% perda massa de H<sub>2</sub>O</b>	46,68 ± 7,75	56,98 ± 17,82	62,39 ± 9,55	< 0,00001

Observou-se na análise descritiva de temperatura inicial (Tabela 11), que tábuas que apresentaram em média a maior umidade inicial foram as da Temperatura inicial de secagem de 50 °C. Contudo, notou-se que a Umidade final da madeira mais próxima dos 10%, Umidade final fixada no forno de micro-ondas, foi observada nas Temperaturas iniciais de 45 °C e 50 °C. Verificou-se que o menor Tempo de secagem foi observado na temperatura de 45 °C, mas esta temperatura em média recebeu madeiras com menor conteúdo de umidade inicial. Para o percentual de perda de água

(% perda de H<sub>2</sub>O) em média, as maiores perdas foram observadas nas temperaturas de 45 °C e 50 °C, apesar da secagem a 45 °C ter apresentado a menor umidade inicial. Realizou-se então o teste de Kruskal - Wallis para verificar se houve diferença entre as médias de cada variável em relação aos níveis de Temperatura inicial. Ao nível de significância de 5% houve diferenças significativas entre as Temperaturas iniciais para todas as variáveis observadas. Em outras palavras, pode-se esperar com 95% de confiança de que houve evidência da Temperatura inicial influenciar no Tempo de secagem e na Umidade final da madeira.

Por isso, verificou-se que a temperatura de 45 °C foi a mais indicada, pois apresentou a Umidade final mais próxima dos 10% e o menor Tempo de secagem, apesar de apresentar a menor Umidade inicial da madeira.

Ao se aplicar o teste de Kruskal - Wallis para as 3 (três) Umidades relativas inicial, tem-se as seguintes hipóteses:

$H_0$  = Não houve diferença de umidade da madeira de Louro - preto para cada umidade relativa inicial.

$H_1$  = Houve diferença de umidade da madeira de Louro - preto para cada Umidade relativa inicial.

Tabela 12. Teste de Kruskal-Wallis para a Umidade relativa inicial da madeira de Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Variáveis	Umidade relativa inicial (%)			P-Valor
	70	80	90	
<b>U% inicial da madeira</b>	23,54 ± 4,19	24,21 ± 5,08	23,94 ± 6,84	0,818499
<b>U% final da madeira</b>	10,62 ± 3,66	9,12 ± 2,89	11,64 ± 3,45	< 0,00001
<b>Diferença</b>	0,62 ± 3,66	-0,88 ± 2,89	1,64 ± 3,45	< 0,00001
<b>Tempo de secagem</b>	1,30 ± 0,18	1,25 ± 0,22	1,32 ± 0,23	0,2382
<b>% perda massa de H<sub>2</sub>O</b>	54,90 ± 14,28	62,21 ± 9,42	48,94 ± 14,68	< 0,00001

A análise da Tabela 12 mostrou que ao nível de significância de 5% houve diferença significativa entre a Umidade relativa inicial para algumas variáveis observadas. Ressalta-se que a Umidade inicial da madeira, que apresentou em média maior umidade, é a de 80%, enquanto que em relação a Umidade final da madeira, as

que apresentaram mais proximidades da Umidade final de 10%, foram as Umidades relativas iniciais de 70% e a de 80%. Verificou-se que o menor tempo de secagem foi observado na Umidade relativa inicial de 80%, contudo esta umidade apresentou, em média, o maior percentual de perda de massa de água. O Teste de Kruskal-Wallis verificou se houve diferença significativa entre as médias de cada variável em relação aos percentuais de Umidades relativas iniciais. Notou-se que ao nível de significância de 5% houve diferença entre as variáveis observadas para todas as Umidades relativas iniciais. Baseado nessa afirmação pode-se concluir que, com 95% de confiabilidade existe a evidência de ter havido influência das Umidades relativas iniciais nas condições finais de secagem.

Notou-se que a Umidade relativa de 80% foi a que apresentou melhores condições, pois mostrou a Umidade final da madeira, próxima aos 10%, além de apresentar o menor Tempo de secagem. Apesar de ter mostrada a maior Umidade inicial da madeira, conseqüentemente apresentou o maior percentual de perda de massa de água.

A aplicação do teste de Kruskal - Wallis para as 3 (três) Umidades relativas finais, permitiu indagar as seguintes hipóteses:

$H_0$  = Não houve diferença de umidade da madeira de Louro - preto para cada umidade relativa final.

$H_1$  = Houve diferença de umidade da madeira de Louro - preto para cada umidade relativa final.

Tabela 13. Teste de Kruskal-Wallis para a Umidade relativa final da madeira de Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Variáveis	Umidade relativa final (%)			P-Valor
	45	55	65	
<b>U% inicial da madeira</b>	25,33 ± 7,05	23,32 ± 3,97	23,05 ± 4,67	0,24234
<b>U% final da madeira</b>	12,42 ± 4,32	9,76 ± 2,39	9,20 ± 2,57	0,000264
<b>Diferença</b>	2,42 ± 4,32	-0,24 ± 2,39	-0,80 ± 2,57	0,000264
<b>Tempo de secagem</b>	1,32 ± 0,26	1,27 ± 0,16	1,28 ± 0,19	0,9883
<b>% perda massa de H<sub>2</sub>O</b>	48,98 ± 17,14	57,63 ± 10,18	59,44 ± 11,72	0,004134

A análise descritiva da Umidade relativa final pode ser observada na Tabela 13. Foi possível verificar que em relação a Umidade inicial da madeira, a Umidade relativa final que apresentou peças com maiores médias foi a de 45%, enquanto as menores e praticamente iguais, foram apresentadas pelas Umidades relativas de 55% e 65%. Quando se analisou a Umidade final da madeira, verificou-se que as Umidades relativas finais que proporcionaram umidades mais próximas da Umidade fixada de 10%, foram a 55% e 65%, não obstante terem apresentado maiores percentuais de perda de massa de água, além de mostrarem o menor Tempo de secagem. Por outro lado, o menor percentual de perda de água foi verificado pela Umidade relativa de 45%, apesar de ter a maior Umidade inicial da madeira. Foi realizado o teste de Kruskal - Wallis para verificar se houve diferença entre as médias de cada variável em relação aos níveis de Umidade relativa final. Ao nível de significância de 5% houve diferenças significativas entre as Temperaturas iniciais para todas as variáveis observadas. Em relação a significância de 5%, verificou-se que existe comportamento semelhante as outras duas variáveis observadas, ou seja, foi possível dizer com segurança que, com 95% de confiança existe a probabilidade da Umidade relativa final influenciar também nos resultados finais de secagem da madeira de Louro - preto.

Ao se analisar mais detalhado o Tempo de secagem nas Tabelas 11, 12 e 13 quando comparadas a Tabela 2, observou-se que todas as secagens realizadas apresentaram o tempo muito rápido, pois todos os ensaios compreendidos no intervalo de 1:16h ( $\pm 0,09$ ) a 1:37h ( $\pm 0,20$ ) estão bem abaixo do valor máximo considerado para essa classe que é de 12h.

A Tabela 14 apresentou a média da Umidade final da madeira (UFM) para cada tratamento e o respectivo desvio padrão. Foi realizado o Teste de Kruskal-Wallis com a finalidade para verificar se houve diferença entre as médias em relação aos tratamentos e verificou-se que todos apresentam diferença significativa a 5%. Após análise de todas as variáveis, foi possível afirmar que a Umidade relativa de 55% e 65% foram as mais indicadas no teste de comparação.

Tabela 14. UFM média e desvio padrão em cada programa Ti-Uri-Urf

Média da Ufm		Temperatura inicial (°C)			Total	P-Valor
Uri(%)	Urf(%)	40	45	50		
	45	14,05 ± 1,69	16,52 ± 2,10	7,82 ± 0,35	12,79 ± 4,05	0,001846
70	55	14,02 ± 1,32	8,28 ± 0,28	7,80 ± 0,21	10,03 ± 3,00	0,0006952
	65	12,60 ± 0,75	6,30 ± 1,84	8,25 ± 0,27	9,05 ± 2,92	0,001548
<b>Total 70</b>		13,56 ± 1,42	10,37 ± 4,80	7,96 ± 0,34	10,62 ± 3,66	< 0,00001
	45	14,77 ± 1,76	7,78 ± 0,56	8,12 ± 0,51	10,22 ± 3,45	0,002704
80	55	11,52 ± 1,70	7,78 ± 1,51	7,57 ± 0,36	8,96 ± 2,18	0,00332
	65	11,00 ± 1,17	6,58 ± 0,29	6,92 ± 2,86	8,17 ± 2,67	0,01406
<b>Total 80</b>		12,43 ± 2,26	7,38 ± 0,92	7,53 ± 1,67	9,11 ± 2,90	< 0,00001
	45	11,22 ± 1,17	11,52 ± 1,06	20,05 ± 2,89	14,24 ± 4,58	0,003127
90	55	11,65 ± 1,48	8,77 ± 0,85	10,45 ± 1,61	10,29 ± 1,76	0,01671
	65	10,58 ± 0,99	8,82 ± 0,43	11,77 ± 1,06	10,39 ± 1,49	0,003822
<b>Total 90</b>		11,15 ± 1,24	9,70 ± 1,53	14,09 ± 4,76	11,65 ± 3,45	0,0006719

Ufm = Umidade final da madeira; Uri = Umidade relativa inicial; Urf = Umidade relativa final.

Realizou-se uma comparação entre as Temperaturas de secagem, onde se observou os resultados obtidos nessa pesquisa através da Tabela 14 e verificou-se que todas as secagens a 40 °C apresentaram maior uniformidade na Umidade final da madeira, porém acima dos 10%, enquanto a secagem a 45 °C e 70% de Umidade relativa inicial apresentou considerável dispersão em relação a média (4,80%) seguida da secagem a 50 °C e 90% (4,76%). Por outro lado, as secagens a 50 °C apresentaram o maior percentual de defeitos, ou seja, todas as secagens mostraram a proporção de 100% da presença de algum tipo de defeito. Nota-se que através dessa comparação de médias, as secagens 40-90-65 e 50-90-55 foram as que mais se aproximaram do valor da Umidade final da madeira (10%). Contudo, descartou-se a secagem a 50-90-55 em função de todas as amostras de madeira apresentarem defeitos.

Tabela 15. Proporção de defeito em cada Programa Ti-Uri-Urf.

Proporção de defeitos		Temperatura inicial (°C)						Total	
		40		45		50			
Uri	Urf	n	%	n	%	n	%	n	%
	45	0	0,00%	0	0,00%	6	100,00%	6	33,33%
70	55	0	0,00%	0	0,00%	6	100,00%	6	33,33%
	65	6	100,00%	6	100,00%	6	100,00%	18	100,00%
	<b>70 Total</b>	6	33,33%	6	33,33%	18	100,00%	30	55,56%
	45	0	0,00%	0	0,00%	6	100,00%	6	33,33%
80	55	6	100,00%	0	0,00%	6	100,00%	12	66,67%
	65	3	50,00%	0	0,00%	6	100,00%	9	50,00%
	<b>80 Total</b>	9	50,00%	0	0,00%	18	100,00%	27	50,00%
	45	1	16,67%	3	50,00%	6	100,00%	10	55,56%
90	55	0	0,00%	0	0,00%	6	100,00%	6	33,33%
	65	6	100,00%	0	0,00%	6	100,00%	12	66,67%
	<b>90 Total</b>	7	38,89%	3	16,67%	18	100,00%	28	51,85%
	<b>Total Geral</b>	22	40,74%	9	16,67%	54	100,00%	85	52,47%

Uri = Umidade relativa inicial; Urf = Umidade relativa final.

Na Tabela 15, verificou-se a proporção de defeito em cada tratamento. É importante notar que as maiores dispersões aconteceram para as madeiras apresentando em geral uma umidade mais elevada. Também foi possível verificar que em média, a menor proporção na formação de defeitos foi encontrada nas secagens a 45 °C e a maior nas secagens a 50 °C. Ao se analisar por secagem propriamente dita, verificou-se que as secagens 40-70-45, 40-70-55, 40-80-45 e 40-90-55 não apresentaram a formação de defeitos, contudo todas mostraram Umidade final superior aos 11% (Tabela 14). Em contra partida, observou-se que a secagem a 40-90-65 mostrou a Umidade final da madeira (Tabela 14) bem mais próximo da Umidade final programada, porém apresentou proporção de 100% de defeito. Ao se analisar o comportamento das secagens a 45 °C, observou-se que apenas as secagens 45-70-65 e 45-90-45 foram as que mostraram proporção de 100% e 50% de defeitos, respectivamente, apesar da secagem 45-90-45 ter apresentado Umidade final em torno de 11%. Embora as outras

secagens apresentem proporcionalmente 0% de defeitos, contudo mostraram Umidade final da madeira bem acima e bem abaixo dos 10%. Quando se analisou a temperatura de 50 °C, observou-se que todas apresentaram Umidade final variando de 6,92% a 14,24%, contudo todas apresentaram proporção de 100% de defeitos, concluindo-se que nenhuma dessas foi passível de ser escolhida.

Quando se analisou a proporção de defeitos em função da Umidade relativa inicial, observou-se que para a Uri de 70%, a secagem que mais se aproximou da Umidade final, porém abaixo da umidade programada de 10% foi a 45-70-55 (8,28%) com proporção de 0% de defeito. Verificou-se nas secagens a 80% de Umidade relativa que todas as secagens a 45 °C mostraram 0% de defeito, com exceção das secagens 45-70-65 (100%) e 45-90-45 (50%). As secagens realizadas a 90% de Umidade relativa que melhores resultados apresentaram foram 40-90-55, 45-90-55 e 45-90-65, contudo a primeira ficou mais próxima da Umidade final de 10%. Todas as secagens que apresentaram 50-70, 50-80 e 50-90 de temperatura e Umidade relativa inicial, respectivamente, foram consideradas inapropriadas em função do alto percentual de defeitos.

Verificou-se ainda na Tabela 15, que a Umidade relativa final de 65% mostrou-se, aparentemente menos adequada para a secagem da madeira de Louro - preto, pois em quase todas as secagens apresentou grande percentual de defeitos, apenas as secagens 45-80-65 e 45-90-65 não mostraram nenhum percentual de defeito. De acordo com HANSON e ANTTI (2005), a evaporação da umidade acima do PSF sai da madeira em função do aumento da pressão interna durante o processo de secagem. Por isso, a Umidade relativa final de 65% pode ter contribuído na formação da pressão interna durante a secagem da madeira, formando uma pressão interna maior do que a resistência da madeira provocando os defeitos apresentados pela espécie de Louro - preto.

## **Teste de Fisher**

O Teste Exato de Fisher e o Teste Chi - quadrado são testes que não dependem de parâmetros como média e variância. O teste Exato de Fisher utiliza tabelas de 2x2 na comparação de 2 (dois) grupos e consiste em determinar a probabilidade exata de ocorrência de uma frequência observada, ou de valores mais

extremos. O Teste Chi - Quadrado ( $\chi^2$ ), se destina a encontrar um valor da dispersão para duas variáveis nominais, comparando as possíveis divergências entre as frequências observadas e as esperadas. Em função da pouca diferença de resultados entre esses testes, optou-se por utilizar uma variação do Teste Exato de Fisher (Teste de Fisher) que compara variáveis de mais de duas amostras (FERNANDES, 1999).

Tabela 16. Teste de Fisher dos Defeitos para as 3 (três) variáveis da madeira de Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Variável	Defeitos				P - Valor
	Sem		Com		
	n	%	n	%	
<b>Temperatura inicial</b>					< 0,0001
40	32	59,26%	22	40,74%	
45	45	83,33%	9	16,67%	
50	0	0,00%	54	100,00%	
<b>Total</b>	77	47,53%	85	52,47%	
<b>U% relativa inicial</b>					0,8409
70	24	44,44%	30	55,56%	
80	27	50,00%	27	50,00%	
90	26	48,15%	28	51,85%	
<b>Total</b>	77	47,53%	85	52,47%	
<b>U% relativa final</b>					0,0016
45	32	59,26%	22	40,74%	
55	30	55,56%	24	44,44%	
65	15	27,78%	39	72,22%	
<b>Total</b>	77	47,53%	85	52,47%	

U% = Umidade; n = número de amostras.

Na Tabela 16 verificou-se a quantidade de defeitos para cada um dos níveis dos fatores. A menor proporção da ocorrência de algum defeito ocorrer na Temperatura inicial de 45 °C foi de 16,67% das madeiras, enquanto que a temperatura de 50 °C, todas as madeiras apresentaram defeitos. Realizou-se o Teste de Fisher para verificar se houve diferenças significativas entre as proporções de defeitos e Temperatura inicial e, ao nível de significância de 5% notou-se que houve diferença significativa entre as proporções de defeitos e a Temperatura inicial. Em relação a

Umidade relativa inicial, verificou-se que as proporções de defeitos foram próximas em cada nível, o que foi confirmado pelo teste, pois este não apresentou diferenças significativas. Porém, verificou-se que matematicamente a Umidade relativa inicial de 70% apresentou a menor proporção de madeira sem defeito. Ao se analisar a Umidade relativa final observou-se que a de 65% apresentou a maior proporção ao defeito, enquanto a Urf de 45% a menor proporção, conseqüentemente foi a que apresentou a maior proporção isenta do defeito. Com a realização do Teste de Fisher verificou-se que houve diferença significativa entre as proporções de defeitos e a Umidade relativa final ao nível de 5%.

Quando se analisou a Tabela 16 foi admissível assegurar, com 95% de certeza, que os parâmetros mais indicados pelo Teste de Fisher, para a secagem da madeira de Louro - preto ocorrer sem problemas foi com a Temperatura inicial de 45 °C, com a Umidade relativa inicial de 80% e com a Umidade relativa final de 45%.

Tabela 17. Teste de Fisher do Defeito Empenamento para as 3 (três) variáveis da madeira de Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Variáveis	Empenamento				P-Valor
	Não		Sim		
Temperatura inicial	n	%	n	%	< 0,0001
40	21	95,45%	1	4,55%	
45	9	100,00%	0	0,00%	
50	12	22,22%	42	77,78%	
<b>Total</b>	42	49,41%	43	50,59%	
U% relativa inicial					0,00055
70	12	40,00%	18	60,00%	
80	8	29,63%	19	70,37%	
90	22	78,57%	6	21,43%	
<b>Total</b>	42	49,41%	43	50,59%	
U% relativa final					0,00051
45	4	18,18%	18	81,82%	
55	11	45,83%	13	54,17%	
65	27	69,23%	12	30,77%	
<b>Total</b>	42	49,41%	43	50,59%	

U% = Umidade; n = número de amostras.

Ao se analisar por defeito específico, verificou-se nas Tabelas 17, 18 e 19 o quantitativo dos defeitos empenamento, racha de superfície e racha de topo para cada um dos níveis dos fatores. Quando se analisou a Tabela 17, verificou-se que a Temperatura inicial de 45 °C não apresentou o defeito empenamento, por outro lado a temperatura de 50 °C mostrou a maior quantidade de defeito. Ao se analisar a Umidade

relativa inicial verificou-se que o menor percentual de empenamento foi apresentado a 90%, enquanto as Umidades relativas iniciais de 70% e 80% mostraram mais da metade do referido defeito. Por um lado, a Umidade relativa final que apresentou maior porcentagem de empenamento foi a 45%. Por outro lado, a Umidade relativa de 65% mostrou-se com menor propensão a provocar o empenamento. O Teste de Fisher foi realizado para verificar a existência de diferenças significativas, e ao nível de significância de 5% mostrou que houve diferença significativa entre o empenamento e todos os fatores estudados.

Pela Tabela 17 pode-se inferir que a melhor série de temperatura e umidades para secar o Louro - preto com o mínimo de empenamento foi a 45-90-65.

Tabela 18. Teste de Fisher do Defeito Rachadura de Topo para as 3 (três) variáveis da madeira de Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Variáveis	Rachadura de Topo				P-Valor
	Não		Sim		
	n	%	n	%	
<b>Temperatura inicial</b>					0,00049
40	0	0,00%	22	100,00%	
45	0	0,00%	9	100,00%	
50	18	33,33%	36	66,67%	
<b>Total</b>	18	21,18%	67	78,82%	
<b>U% relativa inicial</b>					< 0,0001
70	6	20,00%	24	80,00%	
80	12	44,44%	15	55,56%	
90	0	0,00%	28	100,00%	
<b>Total</b>	18	21,18%	67	78,82%	
<b>U% Relativa final</b>					< 0,0001
45	12	54,55%	10	45,45%	
55	0	0,00%	24	100,00%	
65	6	15,38%	33	84,62%	
<b>Total</b>	18	21,18%	67	78,82%	

U% = Umidade; n = número de amostras.

Na Tabela 18, observou-se que as Temperaturas iniciais de 40 °C e 45 °C apresentaram as menores proporções da ocorrência de rachaduras de topo, enquanto a Temperatura inicial de 50 °C o maior percentual. Ao se analisar a Umidade relativa inicial notou-se que a de 90% mostrou ser menos danosa, pois não apresentou percentual de peças com rachaduras de topo. Comportamento menos agressivo, e igual ao anterior também foi verificado quando da análise da Umidade relativa final, pois a de

55% apresentou 0% de peças com rachadura de topo. O Teste de Fisher foi realizado para verificar a existência de diferenças significativas, e ao nível de significância de 5% houve diferença significativa entre o empenamento e todos os fatores estudados.

Notou-se que as variáveis 40-90-55 ou 45-90-55 foram as mais indicadas para a secagem por micro-ondas do Louro - preto, sem a presença de rachadura de topo, conforme Tabela 18.

Tabela 19. Teste de Fisher do Defeito Rachadura de Superfície para as 3 (três) variáveis da madeira de Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013).

Variáveis	Rachadura de Superfície				P-Valor
	Não		Sim		
Temperatura inicial	n	%	n	%	
40	10	45,45%	12	54,55%	
45	3	33,33%	6	66,67%	
50	30	55,56%	24	44,44%	
<b>Total</b>	43	50,59%	42	49,41%	
<b>U% relativa inicial</b>					< 0,0001
70	18	60,00%	12	40,00%	
80	21	77,78%	6	22,22%	
90	4	14,29%	24	85,71%	
<b>Total</b>	43	50,59%	42	49,41%	
<b>U% relativa final</b>					0,004555
45	16	72,73%	6	27,27%	
55	6	25,00%	18	75,00%	
65	21	53,85%	18	46,15%	
<b>Total</b>	43	50,59%	42	49,41%	

U% = Umidade; n = número de amostras.

A Temperatura inicial, conforme Tabela 19, mostrou que a maior proporção de peças com a rachadura de superfície foi a 45 °C enquanto a temperatura de 50 °C mostrou a menor quantidade do defeito. O teste de Fisher mostrou não haver diferença significativa ao nível de 5%, denotando que a proporção da rachadura superficial foi próxima em cada nível estudado. A Umidade relativa inicial de 80% foi a

que apresentou menor quantidade de peças com o referido defeito, enquanto a Umidade relativa inicial de 90% a maior quantidade. Por outro lado, a Umidade relativa final de 55% mostrou maior percentual na formação do defeito rachadura de superfície enquanto a Umidade relativa final de 45% apresentou o menor percentual (27,27%) do referido defeito.

As variáveis que melhores resultados proporcionaram foram a Temperatura inicial de 50 °C, a Umidade relativa inicial de 80% e a Umidade relativa final de 45%. Contudo, conforme Tabela 15 verificou-se que todas as secagens efetuadas com a temperatura inicial de 50 °C apresentaram 100% de defeito.

As análises realizadas através dos Teste de Kruskal - Wallis e Teste de Fisher mostraram que a Temperatura inicial de 45 °C, a Umidade relativa inicial de 90% e a Umidade relativa final de 65% foram as variáveis que melhores resultados apresentaram, ou seja, menor tempo de secagem e menor quantidade de defeitos.

## **6.4 ANÁLISE DO BOX - PLOT**

Nesta pesquisa foi utilizada também, a ferramenta estatística box-plot (MEDRI, 2011) para embasar a tomada de decisão, pois a representação gráfica dos dados consente analisar a simetria dos dados, dispersão e a existência de outliers (valores discrepantes da maioria dos dados). O conhecimento de outliers consiste na detecção das observações surpreendentes, pois são observações suspeitas por serem inconsistentes com os valores restantes. Os outliers podem ser verificados na fase inicial através de observações potencialmente aberrantes, na segunda fase é realizado um teste mais adequado para verificar quanto a sua discordância, e na fase final, decidir o que fazer com essas observações. É muito utilizado na comparação de 2 (dois) ou mais conjuntos de dados correspondentes às categorias de uma variável quantitativa. Nas Figura 16 (a, b e c) verifica-se os box-plots dos três fatores em relação a Umidade final da madeira.

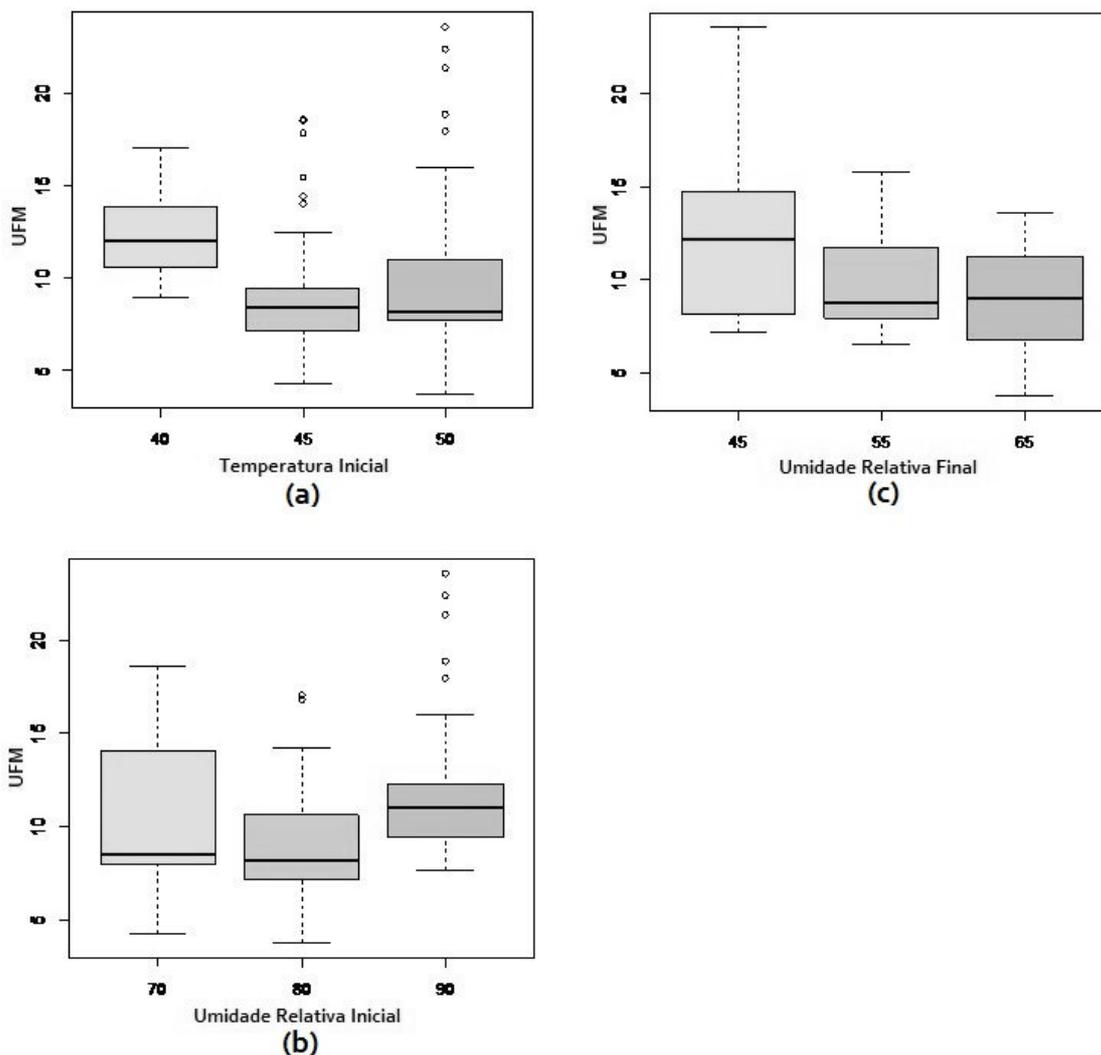


Figura 16. Análises Box-plot da secagem por micro-ondas da madeira Louro-preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013). a) Umidade final da madeira para cada Temperatura inicial; b) Umidade final da madeira para cada Umidade relativa inicial e c) Umidade final da madeira para cada Umidade relativa final.

Na Figura 16a verifica-se o box-plot da Umidade final da madeira em relação a Temperatura inicial. Nas temperaturas de 40 °C e 50 °C observou-se assimetria positiva e na temperatura 45 °C uma assimetria negativa. Nas temperaturas de 45 °C e 50 °C constatou-se a presença de outliers, que são valores atípicos e que pode ser uma característica da secagem por micro-ondas. Notou-se ainda que a temperatura de 50 °C apresentou maior dispersão. Em relação à mediana, verificou-se que as temperaturas de 45 °C e 50 °C foram as que mais se aproximaram do valor da Umidade final da madeira, fixada em 10%.

Analisando a Umidade final da madeira em relação a Umidade relativa inicial, verificou-se através do box-plot (Figura 16b), que para Umidade relativa inicial de 70% e Umidade relativa inicial de 80%, ambas mostraram assimetria negativa e a Umidade relativa inicial de 90%, os dados apresentaram assimetria positiva. Nas Umidades relativas iniciais de 80% e 90% observou-se a presença de outliers. A Umidade relativa inicial que apresentou maior dispersão foi a Uri de 70%.

Na Figura 16c nota-se o box-plot da Umidade final da madeira em relação a Umidade relativa Final, onde verificou-se que não houve a presença de outliers, ou seja não houve valores discrepantes, configurando dessa maneira que não houve influência de causas especiais no processo de secagem. Analisando a Figura 16c, verificou-se que a Urf de 45% apresentou maior dispersão e assimetria positiva, enquanto a Umidade relativa final de 55% apresentou assimetria negativa. Por outro lado, a Umidade relativa de 65% mostrou-se de tendência simétrica. Verificou-se que a mediana mais próxima da umidade final da madeira, estipulada em 10%, foram apresentadas pelas Umidades finais de 55% e 65%.

Nas Figuras 17a, b e c verificam-se os box-plots para a Umidade final da madeira em relação aos três fatores em função da presença de defeitos.

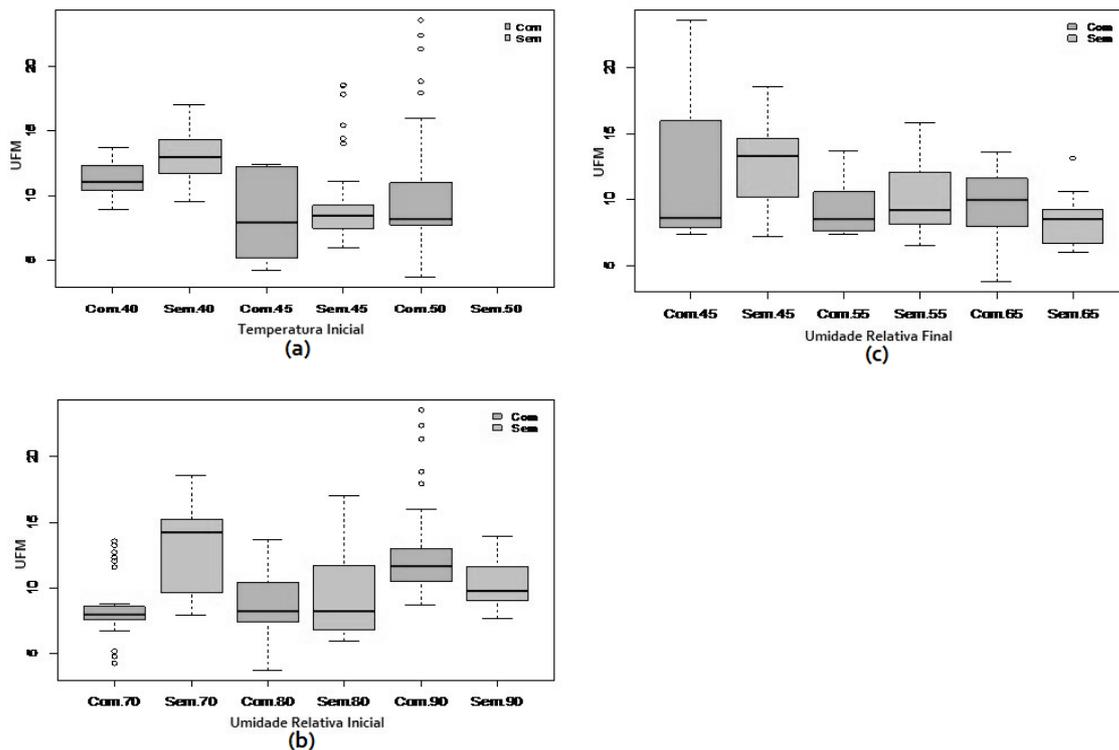


Figura 17. Análises Box-plot da secagem por micro-ondas da madeira Louro-preto dado a presença de defeitos (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013). a) Umidade final da madeira em relação a Temperatura inicial; c) Umidade final da madeira em relação a Umidade relativa inicial, e c) Umidade final da madeira em relação a Umidade relativa final.

Na Figura 17a nota-se o box-plot da Umidade final da madeira em relação à Temperatura inicial em função da presença dos defeitos. Para a  $T_i$  de 40 °C, observou-se que as madeiras que apresentaram defeitos ficaram mais próximas da Umidade final fixada em 10%, do que as que não apresentaram defeito. Por outro lado, a Temperatura inicial de 45 °C mostraram que as madeiras que não apresentaram defeitos foram as que ficaram mais próximas dos 10% fixado, apesar da pequena diferença com as que apresentaram defeitos. Em relação a Temperatura inicial de 50 °C, todas as amostras apresentaram defeitos, apesar de exibirem Umidade final abaixo dos 10%. Ao se analisar a presença de outliers, notou-se que apenas a Temperatura inicial de 45 °C das tábuas sem defeito e a Temperatura inicial de 50 °C das tábuas com defeito, foram as únicas que apresentaram amostras com pontos suspeitos de serem outliers, além disto, variaram menos do que as madeiras que apresentaram defeitos. As Temperaturas iniciais de 40 °C, 45 °C e 50 °C, todas de madeiras com defeitos,

mostraram assimetria positiva, enquanto a Temperatura inicial de 45 °C de madeiras sem defeito, mostraram assimetria negativa. Apenas a Temperatura inicial de 40 °C de madeiras sem defeito, proporcionaram comportamento simétrico. Para a  $T_i$  de 50 °C, além de todas as madeiras apresentarem defeitos, observou-se também a presença de outliers e assimetria positiva.

Na Figura 17b apresenta-se o box-plot da Umidade final da madeira em relação à Umidade relativa inicial dado a presença de defeitos. Para a  $U_{ri}$  de 70%, as madeiras que apresentaram defeitos tiveram menor variabilidade, mas com a presença de outliers. Contudo, as madeiras que não apresentaram defeitos, a  $U_{fm}$  ficou mais distante da Umidade final fixada em 10%, e sem a presença de outliers. Na  $U_{ri}$  de 80% não houve a presença de outliers, porém as medianas foram iguais nas duas condições, madeiras sem e com defeitos. E na  $U_{ri}$  de 90% verificou-se outliers nas madeiras com defeito e as que não apresentaram defeito têm menor variabilidade, e apresentando Umidade final mais próxima dos 10% fixados. Todas as Umidades relativas apresentaram assimetria positiva, com exceção da Umidade relativa inicial de 70% de madeiras sem defeito que apresentaram assimetria negativa.

Na Figura 17c verificou-se o box-plot da Umidade final da madeira em relação à Umidade relativa final em função da presença de defeitos. Para a  $U_{rf}$  de 45%, as madeiras que apresentaram defeitos têm maior assimetria positiva e variabilidade em relação as que não apresentaram defeitos. Para a  $U_{rf}$  de 55%, as madeiras com defeito apresentaram menor variabilidade, mas as medianas bem próximas da Umidade final fixada em 10%, além de apresentarem assimetria positiva. Em relação a  $U_{rf}$  de 65%, observou-se um valor discrepante nas madeiras sem defeito e os dados apresentaram a menor variabilidade. Além disso, os dados das madeiras com defeitos na Umidade relativa de 65% foram bem mais próximos da Umidade final fixada em 10%. As Umidades relativas finais de 45% de madeiras com defeito e a Umidade relativa final de 65% de madeiras com e sem defeito apresentaram assimetria negativa.

## **6.5 ANÁLISE DA VELOCIDADE DE SECAGEM**

Cada tipo de madeira apresenta comportamento próprio durante a secagem com características similares como velocidade de secagem, densidade, umidade inicial, defeitos, etc. Esta avaliação foi realizada para os defeitos

empenamentos, rachaduras de topo, rachaduras de superfície, etc. baseado na sua frequência. A velocidade de secagem, que é uma função de umidade, foi calculada por meio da relação entre a Umidade inicial, Umidade final e o Tempo decorrido, expressa em %/h (Tabela 20). Notou-se que apesar das secagens apresentarem velocidades de secagem diferenciadas, reagiram diferentemente na formação do defeito.

Esta análise aparece em função do apoio das anteriores, em uma tentativa de demarcar, de maneira mais indiscutível, qual Temperatura, qual Umidade relativa inicial e final foram indicadas para a secagem por micro-ondas do Louro - preto. Em uma análise das médias das séries de secagens (Tabela 20), verificou-se que a temperatura de 40 °C apresentou a menor média de velocidade de secagem (8,3 %/h), porém a segunda maior média na formação dos defeitos (40,74%). Em contra partida as Temperaturas de 45 °C e 50 °C mostraram médias de velocidades de secagens bem próximas, de 11,1%/h e 11,7%/h, respectivamente. Porém, a Temperatura de 45 °C mostrou a menor média de proporção aos defeitos (16,67%), enquanto a Temperatura de 50 °C, a maior média (100%). Por isso, a utilização da secagem mais apropriada para o Louro - preto foi a 45-90-55.

Apesar da secagem 50-90-45 apresentar apenas 8,10 %/h de velocidade, mostrou 100% de proporção de defeitos. Igual comportamento também foi verificado para todas as séries de secagem a 50 °C, pois a velocidade de secagem variou de 8,0%/h a 14,73%/h. Pode-se observar que a tendência foi que a velocidade de secagem decrescia a medida que diminuía a quantidade percentual de água evaporada.

Ainda assim, foi possível verificar que as secagens a 40 °C e 45 °C também apresentaram variação na velocidade de secagem e também com a formação de defeitos. Entretanto a diminuição da velocidade em algumas secagens não impediu a formação de defeito, como por exemplo, a secagem a 40-70-65 apresentou a proporção de 100% de defeitos, com velocidade de 8,33%/h. SANTINI e HASELEIN (2002) esclarecem que a velocidade de secagem pode ser atribuída a transferência de calor e massa cujos coeficientes são diretamente proporcionais à velocidade de secagem do ar. Foi possível verificar na Tabela 20 que a velocidade de secagem apresentou uma diminuição em função do teor de umidade. A velocidade de secagem foi praticamente influenciada pela quantidade de água evaporada, o que pode ser observada nas temperaturas pesquisadas.

Tabela 20. Velocidade média de secagem

Velocidade de secagem		Temperatura inicial (°C)														
		40					45					50				
Uri	Urf	Uim	Ufm	Ts	P <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Vs	Uim	Ufm	Ts	P <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Vs	Uim	Ufm	Ts	P <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Vs
70	45	30.8	14.1	1.49	54.2	11.21	21.2	16.5	1.23	22.1	3.82	22.2	7.8	1.23	63.5	11.71
	55	27.3	14	1.53	48.4	8.69	22.8	8.3	1.21	63.7	11.98	21.5	7.8	1.22	63.7	11.23
	65	23.6	12.6	1.32	46.5	8.33	21	6.3	1.20	70.5	12.25	25.8	12.1	1.31	61.5	10.46
<b>Total 70</b>		<b>27.2</b>	<b>13.6</b>	<b>1.45</b>	<b>49.71</b>	<b>9.41</b>	<b>21.7</b>	<b>10.4</b>	<b>1.21</b>	<b>52.11</b>	<b>9.35</b>	<b>23.2</b>	<b>9.2</b>	<b>1.25</b>	<b>62.89</b>	<b>11.13</b>
80	45	35.3	14.8	1.72	58.1	11.92	24	7.8	1.07	67.7	15.14	27.1	8.1	1.29	69.5	14.73
	55	22.6	11.5	1.32	49.0	8.41	21.3	7.8	1.05	62.0	12.86	21.6	7.6	1.24	64.8	11.29
	65	22.4	11	1.30	50.1	8.77	21	6.6	1.03	68.7	13.98	22.7	6.9	1.27	70.1	12.44
<b>Total 80</b>		<b>26.8</b>	<b>12.4</b>	<b>1.45</b>	<b>52.38</b>	<b>9.70</b>	<b>22.1</b>	<b>7.4</b>	<b>1.05</b>	<b>66.13</b>	<b>13.99</b>	<b>23.8</b>	<b>7.5</b>	<b>1.27</b>	<b>68.13</b>	<b>12.82</b>
90	45	17.7	11.2	1.17	36.5	5.56	16.3	11.5	1.12	29.4	4.29	33.3	20.1	1.63	40.0	8.10
	55	19.1	11.6	1.20	38.7	6.25	23.9	8.8	1.24	63.3	12.18	29.9	10.5	1.47	64.9	13.20
	65	17.2	10.6	1.10	38.7	6.00	25.9	8.8	1.27	65.4	13.46	32.2	11.8	1.66	63.5	12.29
<b>Total 90</b>		<b>18</b>	<b>11.1</b>	<b>1.16</b>	<b>37.97</b>	<b>5.94</b>	<b>22.0</b>	<b>9.7</b>	<b>1.21</b>	<b>52.71</b>	<b>9.98</b>	<b>31.8</b>	<b>14.1</b>	<b>1.59</b>	<b>56.14</b>	<b>11.19</b>

Urii (%) = Umidade relativa inicial; Urf (%) = Umidade relativa final; Uim (%) = Umidade inicial da madeira; Ufm (%) = Umidade final da madeira; TS (h) = Tempo de secagem; P<sub>H<sub>2</sub>O</sub> (%) = Perda de água percentual ; VS (%/h) = Velocidade de secagem.

De maneira geral, os resultados obtidos em termos de Umidade final média do material, podem ser avaliados "aceitáveis", sobretudo se forem ponderadas as baixas umidades alcançadas quando se confrontaram com a umidade de equilíbrio da região (18%).

Foi difícil encontrar o melhor modelo de ajuste para os testes realizados com os dados da secagem por micro-ondas. O Método de Superfície de Resposta não mostrou o ajuste esperado, mas a análise estatística através dos testes de Kruskal - Wallis e Teste de Fisher aplicados simultaneamente, mostraram que a madeira de Louro - preto deve ser seca em uma atmosfera onde a Temperatura inicial é de 45 °C, a Umidade relativa inicial de 90% e a Umidade relativa final de 65%. Por outro lado, a análise do Box - Plot indicou que a secagem 45-90-55 foi a mais indicada para secar a madeira de Louro - preto. Contudo, ao se analisar com mais detalhes, verificou-se que o principal fator para a escolha do Programa de Secagem foi o melhor comportamento em relação aos defeitos conforme a Classificação e Grau dos defeitos (Tabela 9) e por defeito específico como Empenamento (Tabela 17), Rachadura de topo (Tabela 18) e Rachadura de Superfície (Tabela 19). Neste caso, o Programa de secagem mais adequado para se ter madeira de Louro - preto, seca e sem problemas de defeito foi a série 45-90-65.

Neste experimento, o Louro – preto apresentou em média, velocidades de secagem variando de 5,94 a 9,70 %/h (40 °C) de 9,35 a 13,99 %/h (45 °C) e de 11,13 a 12,82 %/h (50 °C), porém, para a temperatura de 50 °C todas as amostras em todas as secagens apresentaram defeito. Confrontando-se com o experimento de LEIKER *et al.* (2011) mostram que amostras de Faia foram secas com velocidade máxima de 4,5 %/min., bem acima das determinadas para o Louro – preto. Esses autores chegaram a conclusão de que madeira de Faia pode ser seca por micro-ondas a vácuo sem degradação do material. Apesar da medida de velocidade de secagem estarem com medição diferenciada entre as duas secagens, porém é possível chegar a mesma conclusão, ou seja, a madeira de Louro - preto pode ser seco por micro-ondas.

Comparando-se a secagem por micro – ondas do Louro – preto com a secagem solar de *Corymbia citriodora* (STANGERLIN *et al.*, 2009), verificou-se que esta

apresentou 1,30 %/dia de velocidade de secagem. Notadamente, constatou-se que a velocidade de secagem na estufa solar foi bem mais baixa do que a apresentada no forno por micro-ondas. É importante notar que o procedimento das duas secagens foram diferentes, apesar de levarem em consideração, a Umidade inicial da madeira, o tipo de madeira e o tipo de aquecimento.

## **6.6 ANÁLISE DE ENERGIA ELÉTRICA**

A energia elétrica é um insumo eficaz para a atividade industrial, principalmente para a atividade madeireira, e a garantia de seu abastecimento, com qualidade e segurança, é básico para o incremento da economia e para o desenvolvimento da produção industrial. Na indústria da madeira, o processo mais importante é a secagem, podendo atingir níveis de 50% do custo da produção (MÜLLER, 2007).

A pequena e média empresa (PME) estão começando a ter contato com as questões pautadas em relação a utilização da secagem por micro-ondas, em função do baixo gasto em energia elétrica. As PME's buscam compreender a definição do termo "secagem por micro-ondas" para atuar na direção correta, e com isso promover mudanças em sua estratégia de negócios. As PME's que pretendem investir em processos inovativos como táticas de negócios, devem adotar processos sistêmicos, e com isso obter resultados melhores, mais ainda, adaptando-se de forma rápida às novas tecnologias.

As informações sobre a utilização da energia elétrica na secagem da madeira é melhor discutido no processo convencional. Por outro lado, o conhecimento do gasto da energia elétrica na secagem de madeiras amazônicas por micro-ondas ainda é desconhecido.

Em uma análise não densa, é possível notar que o Estado do Amazonas ainda necessita de um suprimento de energia definitivamente maior e constante (TEIXEIRA e CAVALIERO, 2004), e hoje mais ainda, pois o número de consumidores continua aumentando em função do Polo Industrial da SUFRAMA. Porém, o impacto energético e ambiental gerado para a obtenção de energia elétrica para a secagem por micro-ondas de madeiras Amazônicas não foi discutido no escopo do presente trabalho.

Contudo, a sustentabilidade é tema discutido em vários segmentos, e decorre em função de pesquisas de que o impacto ambiental pode se tornar o limite desse mesmo desenvolvimento ou ser o causador de impactos reversíveis em longo prazo (BATISTA *et al.*, 2012).

Quando se analisa a secagem convencional, verifica-se que o consumo pode ser dividido em energia para aquecimento, energia para vaporização e energia para a circulação do ar. A etapa que mais utiliza energia é o aquecimento, pois segundo ELUSTONDO e OLIVEIRA (2009) é responsável por 50% ou mais do consumo total. Mas, de acordo com KORKUT *et al.* (2013), o consumo de energia em um processo de secagem convencional pode atingir níveis de 80%.

A pesquisa sobre secagem de madeiras tem procurado melhorar a qualidade do processo reduzindo os custos. Por isso, é maior o interesse em pesquisar processos de secagem mais rápidos e mais efetivos, como por exemplo, a secagem por micro-ondas. Este resultado já tinha sido confirmado por DENIG *et al.* (2000) quando mostraram que uma diminuição de 25% na velocidade do ar reduziu aproximadamente 50% na energia gasta em uma secagem convencional.

O valor da energia elétrica praticada no Amazonas e fornecida pela concessionária no atendimento às empresas foi obtido no *site* da ANEEL<sup>3</sup>, o que permitiu a obtenção dos gastos real e a previsão de um mês.

Foi levantado o gasto de energia elétrica relativa ao processo de secagem por micro-ondas da madeira do Louro - preto e o consumo foi calculado por meio do programa Energy Logger, que oferece tecnologia confiável e uma relação de desempenho favorável. O Energy Logger é um dispositivo de medição de custo de energia da família Voltcraft®, e serve para medir e analisar dados relativos ao consumo de aparelhos elétricos, mesmo para as aplicações mais exigentes. Os dados para a estimativa do gasto diário de energia foram obtidos quando se fixou o período (data e horário) correspondente

---

<sup>3</sup> Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acessado em: 06/06/2013.

a secagem da madeira de Louro - preto. O programa Energy Logger, além de realizar o cálculo diário aproximado, mostrou também a previsão mensal e anual. Contudo, nesta pesquisa foi apresentado apenas a quantificação atual e a previsão mensal.

Tabela 21. Custo real e previsão das secagens do Louro - preto (*Nectandra cuspidata*, Manaus, 2013) para 0,0342 m<sup>3</sup>

PS	%/h	Tseca	Defeito	REAL		PREVISÃO	
				kWh(atual)	R\$(atual)	kWh(mês)	R\$(mês)
40-70-45	54,20	1,49	Sem	3,38	1,09	840,31	272,01
40-70-55	48,42	1,53	Sem	3,06	0,53	858,57	148,94
40-70-65	46,49	1,32	RT	3,01	1,01	873,12	294,50
40-80-45	58,05	1,72	Sem	3,85	1,30	967,02	326,15
40-80-55	49,01	1,32	RT e RS	3,77	1,27	953,14	321,48
40-80-65	50,09	1,30	RT	3,19	1,06	819,72	276,47
40-90-45	36,51	1,17	Sem	1,91	0,65	866,78	292,35
40-90-55	38,74	1,20	Sem	2,13	0,73	866,92	292,40
40-90-65	38,66	1,10	RT e RS	1,64	0,54	831,25	280,36
45-70-45	22,08	1,23	Sem	0,39	0,13	984,27	302,54
45-70-55	63,72	1,21	Sem	2,10	0,70	1029,97	347,40
45-70-65	70,52	1,20	RT e RS	2,17	0,73	945,56	318,92
45-80-45	67,68	1,07	Sem	1,89	0,65	880,21	296,89
45-80-55	62,03	1,05	RT e RS	2,14	0,73	1027,95	346,70
45-80-65	68,70	1,03	Sem	1,89	0,65	880,21	296,89
45-90-45	29,45	1,12	RT	0,39	0,13	984,27	302,54
45-90-55	63,28	1,24	RT e RS	2,07	0,70	839,03	282,05
45-90-65	65,41	1,27	Sem	2,05	0,70	1037,30	349,87
50-70-45	63,46	1,23	Sem	2,14	0,73	1027,95	346,70
50-70-55	63,70	1,22	RT/RS/Emp	2,10	0,70	1029,97	347,40
50-70-65	61,50	1,31	RT e Emp	1,94	0,65	1023,07	345,07
50-80-45	69,45	1,29	Emp	1,89	0,65	880,21	296,89
50-80-55	64,80	1,24	RT/Emp	2,64	0,88	974,46	328,67
50-80-65	70,15	1,27	Emp	2,17	0,73	945,56	318,92
50-90-45	39,99	1,63	RT e RS	2,92	0,99	1050,30	354,25
50-90-55	64,95	1,47	RT e RS	3,05	0,96	548,86	172,95
50-90-65	63,50	1,66	RT e RS	2,46	0,83	956,48	318,94

PS = Programa de secagem; %/h = velocidade de secagem; Tseca = Tempo de secagem; kWh = quilo watt hora; R\$ = valor em real.

Os resultados obtidos por meio do programa Energy Logger, podem ser observados na Tabela 21, onde mostrou os valores de kWh e valor em real do custo atual e

de uma previsão para um mês. Como se observou, existe uma tendência da quantidade de kWh acompanhar o percentual de água evaporada, assim como do valor em real (R\$). Observou-se na Tabela 20 e Tabela 21 que a secagem 45-70-45, mostrou menor custo, uma vez que apresentou menor kWh (0,39), conseqüentemente menor percentual de água evaporável -  $P_{H_2O}$  (22,1%). Por outro lado, a secagem 45-70-65 mostrou maior custo, pois apresentou maior quantidade percentual de água evaporável -  $P_{H_2O}$  (70,52%), mostrando portanto, maior valor de kWh (2,17). Apesar de todas as séries de secagens terem seus custos de energia calculados, porém não foi possível calcular a economia de energia, uma vez que não houve condições de comparação com outro método, pois não houve informações da secagem da madeira de Louro - preto.

Em relação à qualidade da madeira no processo com o uso da secagem por micro-ondas verificou-se que o kWh (atual) aumentou conforme acresceu o percentual de perda de água. Considerando o custo de energia elétrica para o período de cada secagem, obteve-se o custo atual e uma previsão para um mês de energia elétrica consumida. Em uma comparação econômica entre os processos com menor (45-80-65) e maior (40-80-45) Tempo de secagem e maior (40-70-65) e menor (45-70-45) percentual de água evaporada, verificou-se que apenas o processo 40-70-65 mostrou defeitos. Contudo, o processo de secagem que se mostrou com melhores resultados foi a 45-90-65, que apresentou a secagem de 65,41%/h de água evaporável em 1h27.

VONGPRADUBCHAI e RATTANADECHO (2009) investigaram a secagem de madeiras em um secador contínuo de micro-ondas com uma potência total de 11,2 kW chegando à conclusão que a penetração foi relativamente profunda, apresentando mais uniformidade de calor em comparação ao micro-ondas simples e outros sistemas de secagem. Foi possível inferir que a penetração das micro-ondas na secagem do Louro – preto (45-90-65) tenha tido comportamento igual, pois o resultado foi significativo em função da Umidade final apresentada.

A madeira de Louro – preto apresentou 2,05 kWh consumidos em sua secagem, porém foi difícil comprovar se estes resultados estavam dentro de um limite aceitável de economia. Apesar de ter sido verificado em um experimento conduzido por

JINDARAT *et al.* (2011) que a comparação dos métodos de secagem por micro-ondas de convecção a ar e por sistema contínuo de correias mostraram que o melhor consumo de energia elétrica é obtida a partir de 4,8 kW, para ambos os processos estudados. Este conhecimento, mesmo em alguns casos não possa ser comparado, significa que o processo de aquecimento e secagem usando a micro-ondas pode ser significativamente importante em futuras pesquisas, na tentativa de se ter eficiência na secagem, como na redução do consumo energético.

Porém, quando se comparou as características de temperatura, teor de umidade, e consumo unitário de energia durante a secagem de madeira de Pinho (DU *et al.*, 2005) e de Louro - preto, verificou-se que as secagens apresentaram mesmo comportamento, são rápidas e eficientes devido ao aquecimento por micro-ondas. A técnica de secagem por micro-ondas, se bem conduzida e planejada, pode economizar energia em até 50% quando comparada ao método convencional (LEIKER *et al.*, 2004).

## **6.7 DEFEITOS DECORRENTES DO PROCESSO DE SECAGEM**

A madeira após a derrubada apresenta uma quantidade de água, bem acima do Ponto de Saturação das Fibras - PSF, limites inaceitáveis para uso imediato. Essa quantidade é função da época do ano, idade da árvore, bem como da própria espécie, entre outros. A madeira e a quantidade de água existente estão estreitamente ligadas pela densidade, pois madeiras pouco densas apresentam grande quantidade de água logo após o seu corte. Quando a madeira é transformada em toras logo após o corte, as paredes celulares começam a perder a água contida em seu interior, provocando o início de uma secagem natural. Durante a perda dessa primeira água que é denominada água livre, a madeira não sofre movimentação dimensional visível. A contração volumétrica passa a ocorrer quando a madeira inicia o processo de perda de água higroscópica, que é aquela que está impregnando as paredes celulares.

A anisotropia e a higroscopicidade da madeira geram tensões na perda da umidade que são visíveis por ocasião do processo de secagem nomeados de deformações e tensões (JANKOWSKY, 2002). A madeira é um produto orgânico, fibroso e poroso que,

devido a higroscopicidade, perde ou ganha umidade provocando alterações em sua estrutura, chamados de "defeitos de secagem" (ERICKSON *et al*, 2010).

Os defeitos além de provocarem a perda de produtividade, dificultam o processo de industrialização da madeira serrada. Na secagem convencional, o controle dos defeitos é praticamente dependente do programa utilizado, porém o controle dos defeitos na secagem por micro-ondas de madeiras amazônicas foi verificado no presente estudo. A seguir são descritos os defeitos ocorridos na secagem por micro-ondas da madeira Louro - preto baseado na Norma para Classificação de Madeira Serrada de Folhosas (BRASIL, 1983).

### **Empenamento do tipo Encanoamento**

A madeira é um material ortotrópico, pois possui comportamento diferente nos planos originais da peça, de acordo com a orientação de suas fibras. É de acordo com essa forma que o empenamento é definido como a deformação que ocorre em uma peça de madeira em função da curvatura dos eixos longitudinal, radial e/ou transversal, que são perpendiculares entre si.

É um tipo de defeito que apresenta arestas ou bordas longitudinais diferente do mesmo nível da zona central, mostrando um aspecto de canoa ou canaleta. De acordo com GALVÃO e JANKOWSKY (1985), o encanoamento pode ser uma consequência da diferença de estabilidade entre a direção radial e a direção tangencial provocando uma movimentação dimensional maior em uma das faces, ou por uma face secar mais rápida que a outra.

A madeira de Louro - preto apresentou o encanoamento em função de uma diferença de umidade que pode ter sido provocada por forças de contração na face seca e forças de tração na face úmida, desenvolvida durante a secagem. Contudo, em uma secagem convencional da madeira de *Eucalyptus benthamii*, MÜLLER (2013) notou a presença de peças com encanoamento em todos os tratamentos, com intensidades entre 1,41 mm a 9,95 mm de flecha, mostrando que o defeito estava relacionado à largura da tábua produzida no desdobro. Porém, nesta secagem por micro-ondas notou-se que a

temperatura pode ter contribuído na formação do defeito, pois se verificou (Tabela 17) que o empenamento ocorreu em sua grande totalidade na temperatura a 50 °C, nas Umidades relativas iniciais de 70% e 80% e na Umidade relativa final de 45%.

### **Rachadura de Topo**

As rachaduras de topo são causadas pela secagem rápida das extremidades durante a fase inicial. Recomenda-se a vedação dos topos das tábuas com produtos impermeáveis, com a finalidade de impedir a movimentação da umidade no sentido longitudinal da peça. Porém, as amostras de Louro - preto não tiveram seus topos impermeabilizados com o intuito de verificar a influência da secagem por micro-ondas na formação da rachadura de topo.

A formação das rachaduras de topo foi distinta em função das variáveis das secagens por micro-ondas testadas (Ti, Uri, Urf) aplicadas a madeira de Louro – preto (Tabela 18), em que todas as amostras das Temperaturas de 40 °C e 45 °C, da Umidade relativa inicial de 90% e da Umidade relativa final de 55% apresentaram 100% do defeito. Constata-se ainda que as outras condições de Temperatura (50 °C), de Umidade relativa inicial (70%, 80%) e Umidade relativa final (45%, 65%) apresentam em média de 40% a 80% de rachadura de topo. É possível inferir que a madeira de Louro - preto apresentou este defeito pela não impermeabilização dos topos.

### **Rachadura de Superfície**

As rachaduras de superfície (Figura 18) desenvolvem-se durante uma secagem inicial muito acelerada provocando o aparecimento de tensões que excedem a resistência da madeira à tração perpendicular as fibras em função de uma diferença acentuada entre as umidades do interior e da superfície da madeira. A racha de superfície é diretamente proporcional à espessura da madeira, pois quanto mais espessa for maior será a possibilidade da formação de rachaduras superficiais.

A racha de superfície observada na madeira de Louro - preto por ocasião da secagem por micro-ondas em todas as secagens realizadas, mostrou que pode ter ocorrido

em função de tendência natural da própria espécie, mesmo por que as umidades iniciais da madeira encontravam-se bem abaixo do Ponto de Saturação das Fibras. Porém foi possível deduzir que as Umidades relativas inicial e final (90% 55%) foram as responsáveis pela formação do defeito (Tabela 19), e o controle para a redução da rachadura de superfície estavam na simples atitude de aumentar a Umidade relativa no interior da câmara de secagem convencional. O procedimento para aumentar a Umidade relativa no forno de secagem por micro-ondas foi conseguido aumentando-se a Umidade relativa anterior ao início do processo de secagem.



Figura 18. Defeito do tipo racha de superfície  
Fonte: Arquivo do autor.

## 6.8 COMPARAÇÃO ENTRE SECAGENS

Os operadores de estufas procuram o melhor processo de secagem de madeira, que seja rápido e que não produza perdas. E com o tempo verificam que não existe um método perfeito, pois depende da utilização final e da necessidade do operador. Porém, se as condições operacionais envolvem falta de experiência do operador ou secadores deficientes, será difícil obter bons resultados.

Quanto maior for a temperatura e o grau de secagem, esta será mais rápida, contudo, a incidência de defeitos será maior. O método de secagem ideal é aquele que gera a melhor combinação entre rapidez e qualidade. A Tabela 22 mostra um comparativo entre os processos de secagens mais utilizados e a secagem por micro-ondas, que deverá ser analisado pelo operador de acordo com os equipamentos disponíveis (secador e sistema de

controle) e com as práticas operacionais adotadas (empilhamento, separação por espécie ou espessura, pré-secagem ao ar, dentre outras).

Tabela 22. Comparativo entre as secagens mais utilizadas.

Secagem	Tempo de Secagem	Pró	Contra
Natural	Meses	Sem equipamentos	Demorada – dependente das condições climáticas
Natural forçada	Meses	Ventilação forçada	Idem
Solar	Dias / Meses	Aquecimento solar	Idem
Convencional	Dias	Aquecimento vapor	Caldeira – alto custo
Desumidificação	Dias	Controle adiabático	Eletricidade
Aquecimento do ar	Dias	Trocador de calor	Falta de umidificação
Transição Vítrea	Dias	Secar várias espécies ao mesmo tempo	Patente em vigor alto custo
Micro-ondas	Horas	Aquecimento eletromagnético	Forno – alto custo

## 6.9 VALIDAÇÃO DO MODELO

Como uma forma de legitimar o modelo de Temperatura e Umidade relativa obtidos da secagem por micro-ondas, foi efetivada a comprovação do modelo dos testes de secagem de 45 °C de Temperatura inicial, 90% de Umidade relativa inicial e 65% de Umidade relativa final dos dados das análises conforme resultados obtidos nas secagens realizadas.

Tabela 23. Valores da secagem por micro-ondas do Louro - preto observadas no processo de validação para 0,0342 m<sup>3</sup>.

Ui(%)	U-MO(%)	Ufreal(%)	%/h	Tseca(h)	Defeito	REAL		REAL		
						kWh(atual)	R\$(atual)	kWh / m <sup>3</sup>	\$ / m <sup>3</sup>	
<b>Primeira Secagem</b>										
Aquec				01:00	SEM	1,79	1,53	52,34	44,74	
Sec	62,96	10	49,63	21,17	12:47	SEM	16,83	14,38	492,11	420,47
Resf				01:00	SEM	0,252	0,21	7,37	6,14	
<b>Segunda Secagem</b>										
Aquec				00:40	SEM	0,85	0,73	24,85	21,35	
Sec	49,63	10	40,05	19,3	05:57	SEM	6,93	15,36	202,63	449,12
Resf				01:00	SEM	0,11	0,08	3,22	2,34	
<b>Terceira Secagem</b>										
Aquec				00:23	SEM	0,48	0,33	14,04	9,65	
Sec	40,05	10	9,99	75,06	03:25	SEM	3,97	3,35	116,08	97,95
Resf				01:00	SEM	0,23	0,2	6,73	5,85	
<b>TOTAL</b>										
Aquec				02:03		3,12	2,59	91,23	75,74	
Sec				22:09		27,11	33,09	810,82	967,54	
Resf				03:00		0,592	0,49	17,32	14,33	
<b>TOTAL GERAL</b>				27:12		30,82	36,17	919,37	1057,61	

Ui(%) = Umidade inicial da madeira; U-MO(%) = Umidade final do forno de micro-ondas; Ufreal(%) = umidade final real das madeiras; %/h = velocidade de secagem; Tseca(h) = Tempo de secagem; kWh(atual) = Quilo watt gasto por etapa; R\$(atual) = Valor em real por etapa; kWh / m<sup>3</sup> = Valor do quilo watt por metro cúbico; \$ / m<sup>3</sup> = Valor das etapas de secagem por metro cúbico.

Na Tabela 23 encontram-se os valores de velocidade de secagem (%/h), tempo de secagem (Tseca - h) e valores de kWh / m<sup>3</sup> e do Real / m<sup>3</sup> para as secagens de 60% a 10% (49,63%), 50% a 10% (40,05) e de 40% a 10% (9,99%) para as fases de aquecimento, secagem propriamente dita e resfriamento da secagem por micro-ondas da madeira Louro - preto. Foi calculada a quantidade real e previsão de kWh / m<sup>3</sup> e consequentemente o custo do processo.

Observou-se ainda (Tabela 23) que a secagem com Umidade inicial de 62,96% mostrou que foi mais difícil secar a madeira com umidade acima do Ponto de

Saturação das Fibras - PSF, pois a Umidade final da madeira no final do processo ainda estava a níveis altos, em média 49,63%. Este resultado mostra que a alta umidade e a profundidade de penetração foram fatores limitantes para a secagem por micro-ondas, conforme explicado por ANTTI (1999). Por outro lado, quando a madeira apresentou Umidade inicial de 40,05%, umidade considerada no nível ideal para a secagem por micro-ondas, atingiu a Umidade final de 9,99%, dentro do nível proposto pela pesquisa.

Ao ser realizada a secagem de validação (45-90-65) a partir de 62,96% de Umidade inicial a madeira necessitou de 14h47 para atingir os 10% de Umidade final fixado no forno, porém a umidade final real foi de 49,63%. Procedeu-se então nova secagem, tendo a Umidade final considerada Umidade inicial, e a secagem demorou 7h37 para chegar aos 10% de Umidade final, contudo a Umidade final real foi de 40,05%. Como o objetivo foi o de secar a madeira até 10% de Umidade final, realizou-se nova secagem, partindo-se dos 40,05%. Obteve-se o tempo de 4h48 para a madeira atingir em média 9,99% de Umidade final real, com um gasto total de 31,44 kWh / m<sup>3</sup> e um custo total de R\$ 36,17 / m<sup>3</sup> nas três secagens. Foi possível que, em função das primeiras secagens estarem com a Umidade inicial acima do Ponto de saturação das fibras - PSF, e apresentando velocidade de secagem bem menores, a evaporação da Umidade da madeira tenha sido em função do aumento da pressão interna durante a secagem, conforme HANSSON e ANTTI (2005). Por outro lado, a terceira secagem que mostrou Umidade inicial bem próxima do PSF, e com uma velocidade de secagem maior, secou ao nível desejado mostrando que a evaporação da umidade da madeira tenha saído em forma de vapor.

Notou-se que o modelo tendeu a demonstrar que quanto maior o teor de umidade das tábuas de madeira, maior deverá ser o tempo de aquecimento, secagem e resfriamento necessários. Obteve-se os tempos de aquecimento, secagem e resfriamento de 14h47, 7h37 e 4h48, respectivamente para as secagens de 62,96% a 49,63%, de 49,63 a 40,05% e de 40,05% a 9,99% de Umidade final. Ao se contabilizar o tempo total gasto nas três secagens, observou-se (Tabela 23) que a secagem de validação do modelo proposto foi considerada moderadamente rápida, pois foi realizado em 27h12.

## 7 CONCLUSÕES

O principal objetivo desta pesquisa foi a determinação dos parâmetros de secagem por micro-ondas do Louro - preto, e com base nos resultados apresentados na Etapa de Teste e na Etapa do Experimento pode-se concluir que:

- a. Etapa de Teste
  - a. antes da Etapa de Teste procedeu-se o ajuste de potência dos magnétons do forno de micro-ondas, onde foi verificado que um dos magnétons (3<sup>o</sup>), estava com maior potência do que os outros. O ajuste foi realizado e após sua equalização, procedeu-se a secagem propriamente dita, ficando evidenciado nesta etapa, conforme Tabela 2, que a secagem por micro-ondas da madeira de Louro - preto pode ser considerada rápida, pois os tempos obtidos foram de 2h25', 2h08' e 2h02' para a realização dos experimentos;
  - b. quando analisado (Tabela 1 e Tabela 3) os resultados referentes aos defeitos ocorridos durante a secagem, percebeu-se que a madeira de Louro - preto apresentou média disposição a racha de superfície e moderadamente pequena a racha de topo, porém não apresentou colapso e não rachou internamente, provavelmente em função de umidade da madeira encontrarse abaixo do Ponto de Saturação das Fibras - PSF;
  - c. observou-se também, que a madeira de Louro - preto não apresentou descoloração e nem sinais de pirólise em sua superfície, revelando que os magnétons foram corretamente ajustados. Mostrando que, provavelmente, a condutividade térmica não foi baixa, o que provocaria o aumento do fator de perda resultando em uma temperatura maior, o que geraria uma mancha de cor escura na madeira. Além disso, se o aquecimento ocorresse no final da secagem e com a ausência de oxigênio, possivelmente, provocaria a pirólise.

b. Etapa do Experimento

- a. realizou-se a aplicação do Método de Superfície de Resposta - MSR com a finalidade de verificar a influência da Temperatura inicial, Umidade relativa inicial e Umidade relativa final na variável Umidade final da madeira, com o intuito de se ter madeira isenta de defeitos e com umidade final de 10%. Porém, o modelo proposto não mostrou ajuste significativo, nem no de primeira e nem no de segunda ordem, pois não atendeu as hipóteses de normalidade e homocedasticidade. Mas, ao se usar uma transformação logarítmica as suposições foram satisfeitas, mas continuava a falta de ajuste. Por esse motivo não foi possível a determinação dos valores otimizados de temperatura e umidades relativas. Em função de não se ter um resultado positivo pela análise de MSR, existe a probabilidade de se extrair um resultado através da discretização de 3 pontos, ou mesmo de uma Análise de Sensibilidade ou uma Análise de Experimentos Fatoriais Fracionários;
- b. como a MSR não surtiu o efeito esperado, utilizou-se o Teste de Kruskal-Wallis, o Teste de Fisher e uma análise através do Box - plot para uma possível determinação dos parâmetros ótimos de secagem. As análises de Kruskal-Wallis e Fisher, em conjunto, determinaram que a sequência de temperatura e umidades relativas ideais para a secagem por micro-ondas do Louro - Preto foram Ti (45°C), Uri (90%) e Urf (65%). Porém, comportamento distinto foi verificado através do Box - plot, pois a melhor indicação diferiu apenas na Umidade relativa final (55%). Contudo, através da comparação mais minuciosa da proporção e grau dos defeitos e entre os defeitos propriamente, verificou-se que as variáveis 45°C (Ti) – 90% (Uri) – 65% (Urf) determinadas pelos Testes de Kruskal-Wallis e Fisher foram os valores mais eficientes confirmados pelos testes não paramétricos;
- c. quando se analisou o consumo energético, verificou-se que a madeira de Louro – preto apresentou um consumo de 2,05 kWh, porém foi complexo comprovar se estava em um limite aceitável de economia. Em um

experimento JINDARAT *et al.* (2011) compararam a secagem por micro-ondas de convecção a ar e a por sistema contínuo de correias, mostrando que ambas possuíam o mesmo consumo de energia elétrica (4,8 kW). Por outro lado, VONGPRADUBCHAI e RATTANADECHO (2009) investigando um secador contínuo de micro-ondas com potência de 11,2 kW chegaram à conclusão que a penetração apresentou mais uniformidade de calor quando comparado ao micro-ondas simples e outras secagens. Por isso, foi possível entender que a secagem do Louro – preto (45-90-65) tenha tido comportamento igual, pois o resultado foi significativo em função da umidade final apresentada;

- d. foi realizado um teste de validação das variáveis encontradas, baseadas nos valores mais eficientes confirmados pelos testes não paramétricos. A validação do programa de secagem foi testada através de 3 (três) secagens. A primeira e a segunda secagem estavam com a umidade inicial (62,96% e 49,63%) acima do Ponto de Saturação das Fibras - PSF (30%) e apresentando as menores velocidades de secagem (21,17 %/h e 19,30 %/h), sugerindo que a umidade da madeira tenha sido evaporada em função do aumento da pressão interna durante o processo de secagem, conforme HANSSON e ANTTI (2005). Porém, a terceira secagem, com aproximadamente 40,05% de umidade inicial e maior velocidade de secagem (75,06 %/h), mostrou que a umidade final alcançada (9,9%) ficou dentro do coeficiente sugerido pelo estudo, indicando que a evaporação da umidade da madeira tenha ocorrido em forma de vapor. Com isso, todas apresentaram o tempo de secagem muito rápido, pois os ensaios estão compreendidos no intervalo de 1:16h ( $\pm 0,09$ ) e 1:37h ( $\pm 0,20$ ), além de não haver a formação de defeitos;

## 7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo se distingue dos sugeridos para secagem convencional, em função do tipo de aquecimento da madeira, pois a dificuldade existente está na movimentação da

umidade acima do ponto de saturação das fibras. Analisa-se, deste modo, que o modelo propõe a necessidade de se conhecer mais e melhor o método de secagem por micro-ondas. Demonstra-se desta maneira a aplicabilidade do modelo sugerido, não obstante uma série de avanços e desenvolvimentos devam ser ampliados no futuro.

O presente estudo apresenta algumas limitações, como por exemplo o pouco conhecimento da secagem de madeiras pelo processo por micro-ondas, como também a utilização de madeiras amazônicas. Porém, a finalidade do estudo não foi abordar de forma extensiva o assunto e nem considerar toda a sua complicação, mas trazer à discussão tão relevante problema. Percebe-se que as limitações apresentadas são consideradas almejavéis, pois através de estudos subsequentes, serão gerados aperfeiçoamentos para as futuras utilizações.

Em função da impossibilidade de se ter um resultado positivo por meio da análise de MSR, indica-se então, a realização para trabalhos futuros, a utilização de uma discretização de 3 pontos. Ou ainda, a possibilidade de determinação das estimações ótimas através da realização de uma Análise de Sensibilidade ou mesmo através de uma Análise de Experimentos Fatoriais Fracionários.

Outras sugestões para futuros trabalhos que deem seguimento ao que foi efetivado, pode ser aplicado na secagem e produzir madeiras sem ou com o mínimo de defeitos. Como o interesse foi analisar a secagem de madeiras amazônicas por micro-ondas, é de se esperar que os enfoques nas pesquisas desta nova tecnologia seja no controle do processo, custos da eletricidade, programas de secagem, etc. Além disso, benefícios como a diminuição do tempo de secagem, a economia de energia, melhora da qualidade e o fato de que a tecnologia seja amiga do ambiente, admitem prever um incremento célere e dinâmico da secagem por micro-ondas de madeiras amazônicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTTI, L. 1999, *Heating and drying wood using microwave power*. PhD Thesis, Luleå University of Technology, Skelleftea, Sweden.
- BARROS NETO, B., SCARMINIO, I.E., BRUNS, R.E., 2010. *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. 4 ed. Porto Alegre. Bookman.
- BASILICO, C., 1985, *Séchage Convectif à Haute Température du Bois Massif. Etude des Mécanismes de Transport de Chaleur et de Masse*. Thèse d'Etat. Institut National Polytechnique de Lorraine, Lorraine, France.
- BATISTA. B.M.F., SÁNCHEZ, D.C.M., SILVA, J.V. *et al.*, 2012, "Revisão dos impactos ambientais gerados na fase de instalação das hidrelétricas: uma análise da sub-bacia do alto Juruena-MT", *Biodiversidade*, v. 11, n. 1, pp. 1-69.
- BATISTA, D.C., KLITZKE, R.J., ROCHA, M.P., 2012, "Proposta de programas de secagem para a madeira de "Guajará" (*Micropholis venulosa* Mart. et Eichler) Pierre, SAPOTACEAE", *Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)*, v.03, n. 01, pp. 22-32.
- BOX, G.E.P., DRAPER, N.R., 2007. *Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses*. 2nd Ed. International Statistical Review.
- BRANDÃO, A.T.O., 1989, *Determinação de Metodologia para a Indicação de Programas de Secagem de Madeiras*. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESAL/USP, Piracicaba, SP, Brasil.
- BRASIL., 1981. *Estudos sobre métodos de secagem de madeiras da Amazônia*. Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia, SUDAM, Belém.
- BRASIL., 1983. *Norma para classificação de madeira serrada de folhosas*. Brasília: Ministério da Agricultura, IBDF, Laboratório de Produtos Florestais.

- BRASIL., 2009. *Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos*. Projeto PNUD BRA 00/20 - Apoio às Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle Ambiental. Ministério do Meio Ambiente - MME.
- BROD, F.P.R.; ALONSO, L.F.T.; PARK, K.J. 1999. Secagem de produtos agrícolas. XI SEMEAGRI – Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp, Campinas, 122p.
- BROTERO, F. A., 1941. *Secagem da madeira em estufa*. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
- CALEGARI, L., STANGERLIN, D.M., SANTINI, E.J. *et al.*, 2007. "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*, v. 17, n.4, pp. 399 - 408.
- COMMITTEE ON MICROWAVE PROCESSING OF MATERIALS: an emerging industrial technology., 1994, *Microwave Processing of Materials*. In: *National Materials Advisory Board*. Commission on Engineering and Technical Systems. National Research Council. pp. 165.
- COVOLATO, R.A. 2007. *Desenvolvimento de compósito constituído de resíduos de madeira e resina uréia formaldeído com cura incentivada por micro-ondas*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de Mauá. Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, RS, Brasil.
- DENIG, J., WENGERT, E.M., SIMPSON, W.T., 2000., *Drying hardwood lumber*. Gen. Tech. Rep. FPL – GTR – 118. Madison, WI.
- DU, G., WANG, S., CAI, Z., 2005, "Microwave Drying of Wood Strands". *FPL. Drying Technology*, v. 23, pp. 1–16.
- ELUSTONDO, D.M., OLIVEIRA, L., 2009, Model to assess energy consumption in industrial lumber kilns". *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, v. 11, n. 1, pp. 33 - 46.

- ERICKSON, R.W., PETERSEN, H.D., SEAVEY, R.T., 2010, "Adrift in the "See" of green kerfing". In: *11th International IUFRO Wood Drying Conference*. Editors: T. Morén, L. Antti, M. Sehlstedt-Persson. Skellefteå, Sweden. pp. 185 - 193.
- FELDER, C., AZZOLINI, J.C., 2013, Estudo da viabilidade de queima de resíduos originários da indústria de laticínio". *Unoesc & Ciência*, v. 4, n. 1, pp. 71-84.
- FERNANDES, E.M.G.P., 1999, *Estatística aplicada*. Ed. Universidade do Minho, Braga.
- FREIRE, L.A.C., 2011, *Montagem e operação de um secador pneumático tipo flash*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RGN, Brasil.
- FUJIYOSHI, S., 2001, *Processo revolucionário de secagem de madeira*. In: *Gazeta Mercantil*, pp.4. Amazonas.
- GALVÃO, A.P.M., JANKOWSKY, I.P., 1985, *Secagem Racional da Madeira*. Ed. Nobel. São Paulo.
- GAO, F. 2010. *Comparison of Microwave Drying and Conventional Drying of Coal*. Degree of Master of Applied Science, Queen's University Kingston, Ontario, Canada.
- HANSSON, L. 2007. *Microwave Treatment of Wood*. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology. Skellefteå, Sweden.
- HANSSON, L., ANTTI, A.L., 2003a, "Design and performance of an industrial microwave drier for on-line drying of wood components". In: *The 8<sup>th</sup> International IUFRO Wood Drying Conference*. pp. 156-158. Brasov, Romania, August.
- HANSSON, L., ANTTI, A.L. 2003b., "The effect of microwave drying on Norway spruce woods strength: a comparison with conventional drying". *Journal of Materials Processing Technology*, n. 141, pp 41-50.

- HANSSON, L., ANTTI, A.L., 2005, "The effect of drying method and temperature level on the hardness of wood". *Journal of Materials Processing Technology*, n. 171, pp. 467-470.
- HANSSON, L., LUNDGREN, N., ANTTI A.L, *et al.*, 2005a., "FEM simulation of interactions between wood and microwaves". *Journal of Wood Science*, v. 52, n. 5, pp. 406-410.
- HANSSON, L., LUNDGREN, N., ANTTI A.L. *et al.*, 2005b., *FEM simulation of heating wood in an industrial microwave applicator*. In: *10<sup>th</sup> International Conference on Microwave and High Frequency Heating*, pp. 12-15, Modena, Italy, September.
- HILDEBRAND, R. 1970. *Kiln Drying of Sawn Timber*. Muertingen. Germany. Robert Hildebrand Maschinenbau GmbH.
- JANKOWSKY, I.P. 2002. *Defeitos na secagem de madeiras*. Piracicaba. Disponível em: <http://www.ipef.br/tecprodutos/defsecagem.asp>, Acesso em 20 de outubro de 2011.
- JANKOWSKY, I.P., CHIMELO, P., CAVALCANTE, A.A. *et al.*, 1990. *Madeiras Brasileiras*. V. 1. Spectrum. Caxias do Sul, RS.
- JINDARAT, W; RATTANADECHO; VONGPRADUBCHAI, S. *et al.* 2011. "Analysis of Energy Consumption in Drying Process of Non Hygroscopic Porous Packed Bed Using a Combined Multi-Feed Microwave-Convective Air and Continuous Belt System (CMCB)". *Drying Technology*, v. 29, pp. 926–938.
- KAUMANN, W.G. 1983."Les Problèmes du Séchage". In: *Réunion Centres Techniques – CNRS*, França, Paris.
- KEEY, R.B., 1978. *Introduction to Industrial Drying Operations*. Pergamon Press, Grã Bretanha, Londres.

- KORKUT, S., UNSAL, O., KOCAEFE, D. *et al.*, 2013, "Evaluation of kiln - drying schedules for wild cherry wood (*Cerasus avium*)". *Maderas: Ciencia y Tecnologia*. v. 15, n. 3. pp. 281 - 292.
- LERINGER, C., 2011, *Permeability improvement of Norway spruce wood with the white rot fungus *Physisporinus vitreus**. Ph.D. Dissertation. University Gottingen. Gottingen.
- LEIKER, M. 2007. *Beitrag zur Mikrowellentrocknung von Einzelkörpern im Grobvakuum am Beispiel der Schnittholztrocknung*. Thesis Doktoringenieur, Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden. Dresden, Deutschland.
- LEIKER, M., ADAMSKA, M. A., GÜTTEL, R., MOLLEKPOF, N., 2004, *Vacuum Microwave Drying of Beech: Property Profiles and Energy Efficiency*. In: *Ex proceedings: COST E15 Conference, Athens, N.A.G.R.E.F.*, pp. 22-24.
- LEIKER, M., AURICH, K. 2003: "Sorption Behaviour of Microwave Dried Wood". In: *Proceedings of the 8th IUFRO Wood Drying Conference*. Brasov, Romania, pp. 237-240.
- LEIKER, M., AURICH, K., ADAMSKA, M.A., 2011, "Accelerated Drying of Single Hardwood Boards by Combined Vacuum-Microwave Application". Disponível em: [http://tudresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/akultaet\\_maschinenwesen/ifvu/tvu/dteien/pdfs/Accelerated\\_Drying.pdf](http://tudresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/akultaet_maschinenwesen/ifvu/tvu/dteien/pdfs/Accelerated_Drying.pdf). Acesso em 20 de janeiro de 2011.
- LEPAGE, E.S., 1986, *Química da Madeira*. In: *Manual de Preservação de Madeiras*. v. I, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.
- LIMA, L.M.Q., CAVALCANTE, A.A., 1983, "Módulo para secagem de madeiras – Aplicações tecnológicas da energia solar". *Acta Amazonica*, v. 13, ns. 5-6, pp. 869 – 873.

- LOPES, F.J., 2013, *Estudo do fenômeno de encolhimento na secagem convectiva de abacaxi com aplicação de micro-ondas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campo de Goytacazes, RJ, Brasil.
- LUNDGREN, N., HANSSON, L., HAGMAN, O., ANTTI A.L., 2006, "Finite element modeling (FEM) simulation of interactions between microwaves and wood during tawing". In: *AIP Conference Proceedings. 2<sup>nd</sup> Conference on Mathematical Modelling of Wave Phenomena*, Växjö, Sweden. 14-19 August, pp. 260-267.
- MACHADO, R.S., 2006, "Effect of microwave treatment on oak compression strength"., *Silva Lusitânica*, v. 14, n. 1, pp. 51-58.
- MAYS, S.L.A. 2005. "A Practical Comparison of Moisture Measuring Systems. Electronic Wood Systems", Ligna 2005. Hannover, Alemanha.
- McLOUGHLIN, C.M., McMINN, W.A.M., MAGEE, T.R.A. 2003. "Microwave drying of multi-component powder systems", *Drying Technology*, v. 21, n. 2, pp. 293–309.
- MEDRI, W. 2011. Análise exploratório de dados. Universidade Estadual de Londrina, Paraná, Centro de Ciências Exatas, CCE. 78p.
- MELLADO, E.C.E.R., 2007, *Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Pr, Brasil
- MELO, R.C., 2005, *Controle e instrumentação de sistemas de secagem de madeira na indústria moveleira*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, Brasil.
- MENDES, A.S., MARTINS, V.A., MARQUES, M.H.B., 1998. *Programas de secagem para madeiras brasileiras*, Brasília: IBAMA, 114p.

- MORAES, R.G., 2004, *Secagem por radiações micro-ondas e seus efeitos nas propriedades de papéis reciclados*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. MG, Brasil.
- MORAES, P.L.R., 2005, "Sinopse das Lauraceas nos estados de Goiás e Tocantins, Brasil", *Biota Neotropica*, v. 5, n. 2. pp.1-18.
- MÜLLER, B.V. 2013. *Efeito de sistemas de desdobro na qualidade e rendimento de madeira serrada de **Eucalyptus benthamii** MAIDEN ET CAMBAGE*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Pr, Brasil.
- MÜLLER, T.S. 2007. *Redução do Consumo de Energia Elétrica no Processo de Secagem de **Pinus taeda***. Monografia de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Pr, Brasil.
- MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C., ANDERSON-COOK, C.M., 2009, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Third Edition, Wiley Series in Probability and Statistics.
- OLIVEIRA, J.T.S.; TOMAZELLO F<sup>o</sup>, M.; FIEDLER, N.C., 2010, "Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de Eucalyptus" *Árvore*, v. 34, n. 5, pp. 929-936.
- OLIVEIRA, L.C.S, SKAAR, C., WENGERT, E.M., 1982, "Solar and air lumber drying during winter in Virginia". *Forest Prod. J.*, pp. 37–44.
- OSEPCHUK, J.M., 2002, *Microwave Power Applications*. In: IEEE T. Microw. Theory. pp. 975–985.
- PEIXOTO, P.S. 2013. *Análise de discretizações e interpolações em malhas icosaédricas e aplicações em modelos de transporte semi-lagrangianos*. Tese de Doutorado. Instituto de Matemática e Estatística - IME/USP. São Paulo, São Paulo.

- PEREZ, I.G., OLIVEIRA, F.M.N., ANDRADE, J.S., Moreira F<sup>o</sup>., M., 2013, "Cinética de secagem da polpa cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré desidratada por imersão-impregnação", *Revista Ciência Agronômica*, v. 44, n. 1, p. 102-106.
- PINHEIRO, M.A., 2013, *Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa - UFV. Viçosa, MG, Brasil.
- RODRIGUES, M.I., IEMMA, A. F., 2005. Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos. Ed. Casa do Pão, Campinas, SP.
- ROSSO, S., 2006, *Qualidade da madeira de três espécies de Eucalyptus resultante da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, RGS, Brasil.
- SANTANNA-GRECO, J.A., FABBRI, G.T.P., 2003. "Considerações sobre planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos – exemplo d aplicação a um caso de infra - estrutura de transportes", ENTECA 2003 - IV ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA , São Carlos, São Paulo. pp. 419-430.
- SANTINI, E.J., HASELEIN, C.R., 2002, "Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm", *Ciência Florestal*, v. 12, n 2, pp. 99-106.
- SETTI, M.O.G., 2009, *O processo de discretização do raciocínio matemático na tradução para o raciocínio computacional: um estudo de caso no ensino/aprendizagem de algoritmos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, Brasil.
- SEVERO, E.T.D., 2000, "Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*". *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.10, n.1, pp.109-124.

- SEYFARTH, R., LEIKER, M., MOLLEKOPF, N., 2003, "Continuous Drying of Lumber in a Microwave Vacuum Kiln". In: *8th International IUFRO Wood Drying Conference*.
- SIAU, J.F., 1971. *Flow in Wood*. Syracuse. Syracuse University Press. (Syracuse Wood Science Series, 1).
- SILVEIRA, J.C.; BUSATO, N.V.; COSTA, A.O.S. *et al.*, 2013, "Estratégias de discretização da condição de simetria na solução numérica da secagem de bananas". *Enciclopédia Biosfera*, v.9, N.16; pp. 2906- 2918.
- SOLLIDAY, D.S., ARMSTRONG, J.P., DAWSON, B. E. 1999. "Dehumidification drying of red oak". Part 1. Chemical characterization of volatile organic compounds, *Forest Prod. J.*, v. 49, ns. 7/8, pp. 21–23.
- SOUSA, W.C.B. 2013. *Metodologia de discretização espacial para o método radial de interpolação por pontos (RPIM) aplicada para solução numérica das equações de Maxwell*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará - UFPA / ITEC. Belém, Pa. Brasil.
- STANGERLIN, D.M., SANTINI, E.J., SUSIN, F. *et al.*, 2009, "Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada", *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 461-472.
- TANAKA, T., AVRAMIDIS, S., S., 2010, "A preliminary study on ultrasonic treatment effect on transverse wood permeability", *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, v. 12, n. 1, pp. 3-9.
- TEIXEIRA, A.F., CAVALIERO, C.K.N., 2004, O impacto sócio-ambiental da geração de energia elétrica nas vilas e municípios do interior do Estado do Amazonas. *Encontro de Energia no Meio Rural*, v. 1, n. 5. pp. 7.
- TOMITA, H., TSUGAWA, M., SATOH, M., GOTO. K., 2001, "Shallow water model on a modified icosahedral geodesic grid by using spring dynamics". *J. Comput. Phys.*, v. 174, n. 2, pp. 579–613.

- TORGOVNIKOV, G., VINDEN, P. 2009. "High-intensity microwave wood modification for increasing permeability", *Forest Products Journal*, v. 59, n. 4, pp. 84-92
- TORGOVNIKOV, G., VINDEN, P. 2010. "Microwave Wood Modification Technology and Its Applications", *Forest Products Journal*, v. 60, n. 2, pp. 173-182
- TREU, A., RIECHE, H., MILITZ, H., 2008, *Spruce and pine heartwood treatment by means of microwave radiation*. In: International Research Group on Wood Protection. Document 08-40411, 39<sup>th</sup> Annual Meeting, Istanbul, Türkiye
- TRIANOSKI, R. 2012. *Avaliação da qualidade da madeira de espécies de pinus tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, Pr, Brasil.
- TROXELL, H.E., MULLER, L. A. 1968. "Solar lumber drying in the central rocky mountain region", *Forest Prod. J.*, v. 18, n. 1, pp. 19-24.
- VALENTE, R.O.A., VETTORAZZI, C.A., 2009. "Comparação entre métodos de análise de sensibilidade, empregados na tomada de decisão com a avaliação multicriterial, *Scientia Forestalis.*, v. 37, n. 82. pp. 197-211.
- VALVERDE, S.R.A., 2000, *Contribuição do Setor Florestal para o Desenvolvimento sócio – econômico: Uma Aplicação de Modelos de Equilíbrio Multissetoriais*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.
- VINDEN, P., TORGOVNIKOV, G., HANN, J. 2010. "Microwave modification of Radiata pine railway sleepers for preservative treatment", *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 69, n. 2, pp. 271-279.
- VONGPRADUBCHAI, S., RATTANADECHO, P., 2009, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. In: Chemical Engineering and Processing 48, pp. 997-1003.

- WELLER, H., THUBURN, J., COTTER, C.J., 2012 C, "Computational modes and grid imprinting on five quasi-uniform spherical C-grids", *Mon. Wea. Rev.*, v. 140, n. 8, pp. 2734–2755.
- WENGERT, E.M. 1971a. *Making Management Decisions in Lumber Drying*. Sandston, Virginia. Lumber Manufacturers Association of Virginia.
- WENGERT, E.M. 1971b. "Improvements in solar dry kiln design". *U. S. Forest Service*, Research Note FPL – 0212, pp. 1-10.
- WELLER, H., THUBURN, J., COTTER, C.J., 2012 C, "Computational modes and grid imprinting on five quasi-uniform spherical C-grids", *Mon. Wea. Rev.*, v. 140, n. 8, pp. 2734–2755.
- XIA, D.K., PICKLES, C.A. 1990. "Applications of Microwave Energy in extractive Metallurgy, a Review", *CIM Bulletin*, v. 90, pp. 96-107
- YANG, H. W., GUNASEKARAN, S. 2004. "Comparison of temperature distribution in model food cylinders based on Maxwell's equations and Lambert's law during pulsed microwave heating", *Journal of Food Engineering*, n. 64. pp. 445–453.

## ANEXO

Valores da secagem por micro-ondas do Louro - preto utilizadas nas análises estatísticas.

TI	URI	URF	Rep	UIM	UMO	UFM	Erro	Peso	TS	Defeito	Perda	Tipo Defeito
40	70	45	1	21,9	10	10,7	0,7	1,66	1,30	0	50,92	Não apresentou
40	70	45	2	32,7	10	14,4	4,4	1,63	1,56	0	55,97	Não apresentou
40	70	45	3	32,5	10	14,5	4,5	1,68	1,57	0	55,45	Não apresentou
40	70	45	4	30,4	10	14,4	4,4	1,61	1,50	0	52,67	Não apresentou
40	70	45	5	33,4	10	14,8	4,8	1,73	2,01	0	55,66	Não apresentou
40	70	45	6	34,1	10	15,5	5,5	1,64	1,00	0	54,55	Não apresentou
40	70	55	1	27,4	10	14,1	4,1	1,67	1,44	0	48,54	Não apresentou
40	70	55	2	28,4	10	14,1	4,1	1,63	1,45	0	50,42	Não apresentou
40	70	55	3	22,7	10	12,9	2,9	1,73	1,33	0	43,13	Não apresentou
40	70	55	4	23,1	10	12,2	2,2	1,87	1,37	0	47,29	Não apresentou
40	70	55	5	30,8	10	15,0	5,0	1,71	1,54	0	51,36	Não apresentou
40	70	55	6	31,5	10	15,8	5,8	1,90	2,02	0	49,78	Não apresentou
40	70	65	1	24,3	10	13,6	3,6	1,55	1,34	1	44,15	RT
40	70	65	2	23,9	10	13,3	3,3	1,27	1,25	1	44,49	RT
40	70	65	3	21,4	10	12,1	2,1	1,73	1,30	1	43,59	RT
40	70	65	4	24,7	10	12,7	2,7	1,55	1,36	1	48,45	RT
40	70	65	5	25,6	10	12,3	2,3	1,49	1,35	1	51,81	RT
40	70	65	6	21,6	10	11,6	1,6	1,63	1,29	1	46,47	RT
40	80	45	1	32,2	10	13,9	3,9	1,67	1,56	0	56,83	Não apresentou
40	80	45	2	34,9	10	16,8	6,8	1,68	2,03	0	51,84	Não apresentou
40	80	45	3	32,4	10	13,7	3,7	1,71	1,58	0	57,78	Não apresentou
40	80	45	4	40,8	10	17,1	7,1	1,46	2,08	0	58,11	Não apresentou
40	80	45	5	38,9	10	14,3	4,3	1,25	1,55	0	63,39	Não apresentou
40	80	45	6	32,3	10	12,8	2,8	1,44	1,49	0	60,37	Não apresentou
40	80	55	1	25,2	10	13,7	3,7	1,74	1,40	1	45,65	RT e RS
40	80	55	2	26,5	10	13,7	3,7	1,59	1,40	1	48,20	RT e RS
40	80	55	3	21,7	10	10,7	0,7	1,6	1,29	1	50,62	RT e RS
40	80	55	4	20,2	10	10,2	0,2	1,66	1,26	1	49,28	RT e RS
40	80	55	5	21,1	10	10,4	0,4	1,61	1,27	1	50,71	RT e RS
40	80	55	6	20,7	10	10,4	0,4	1,69	1,28	1	49,57	RT e RS + empenamento
40	80	65	1	21,9	10	10,7	0,7	1,49	1,27	1	50,93	RT
40	80	65	2	23,2	10	11,2	1,2	1,6	1,32	1	51,58	RT
40	80	65	3	18,9	10	9,8	-0,2	1,59	1,22	1	48,02	RT
40	80	65	4	18,2	10	10,7	0,7	1,47	1,19	0	41,37	Não apresentou
40	80	65	5	21,3	10	10,4	0,4	1,63	1,28	0	51,10	Não apresentou

Continua

40	80	65	6	31,0	10	13,2	3,2	1,57	1,50	0	57,51	Não apresentou
40	90	45	1	21,2	10	12,9	2,9	1,35	1,23	0	39,11	Não apresentou
40	90	45	2	19,9	10	12,0	2,0	1,24	1,19	0	39,66	Não apresentou
40	90	45	3	16,7	10	10,4	0,4	1,25	1,13	1	37,92	RT
40	90	45	4	14,9	10	9,8	-0,2	1,63	1,12	0	33,89	Não apresentou
40	90	45	5	16,5	10	10,5	0,5	1,55	1,16	0	36,51	Não apresentou
40	90	45	6	17,2	10	11,7	1,7	1,57	1,17	0	31,96	Não apresentou
40	90	55	1	17,5	10	9,6	-0,4	1,57	1,18	0	45,20	Não apresentou
40	90	55	2	24,1	10	13,9	3,9	1,38	1,30	0	42,24	Não apresentou
40	90	55	3	18,7	10	10,5	0,5	1,16	1,16	0	43,84	Não apresentou
40	90	55	4	17,9	10	11,8	1,8	1,6	1,19	0	34,37	Não apresentou
40	90	55	5	18,4	10	12,1	2,1	1,5	1,19	0	34,33	Não apresentou
40	90	55	6	17,7	10	12,0	2,0	1,51	1,18	0	32,45	Não apresentou
40	90	65	1	16,3	10	10,0	0,0	1,16	1,11	1	38,89	RT e RS
40	90	65	2	18,1	10	11,4	1,4	1,12	1,14	1	37,03	RT e RS
40	90	65	3	17,0	10	10,5	0,5	1,2	1,13	1	37,93	RT e RS
40	90	65	4	17,6	10	10,9	0,9	1,47	1,17	1	37,81	RT e RS
40	90	65	5	18,9	10	11,7	1,7	1,61	1,22	1	38,36	RT e RS
40	90	65	6	15,4	10	9,0	-1,0	1,36	1,12	1	41,92	RT e RS
45	70	45	1	19,1	10	15,5	5,5	1,24	1,17	0	19,05	Não apresentou
45	70	45	2	18,8	10	14,5	4,5	1,21	1,16	0	23,24	Não apresentou
45	70	45	3	18,2	10	14,0	4,0	1,22	1,16	0	23,08	Não apresentou
45	70	45	4	23,4	10	18,6	8,6	1,4	1,29	0	20,57	Não apresentou
45	70	45	5	23,6	10	17,9	7,9	1,38	1,29	0	24,33	Não apresentou
45	70	45	6	23,9	10	18,6	8,6	1,33	1,28	0	22,22	Não apresentou
45	70	55	1	23,1	10	8,0	-2,0	1,13	1,23	0	65,23	Não apresentou
45	70	55	2	23,0	10	8,1	-1,9	1,09	1,21	0	64,72	Não apresentou
45	70	55	3	22,6	10	8,0	-2,0	1,11	1,20	0	64,65	Não apresentou
45	70	55	4	23,1	10	8,6	-1,4	1,06	1,21	0	62,91	Não apresentou
45	70	55	5	22,6	10	8,5	-1,5	1,06	1,21	0	62,38	Não apresentou
45	70	55	6	22,6	10	8,5	-1,5	1,11	1,21	0	62,42	Não apresentou
45	70	65	1	23,2	10	8,9	-1,1	1,28	1,26	1	61,76	RT e RS
45	70	65	2	19,0	10	5,2	-4,8	1,34	1,19	1	72,83	RT e RS
45	70	65	3	16,5	10	4,3	-5,7	1,41	1,14	1	74,19	RT e RS
45	70	65	4	20,1	10	4,8	-5,2	1,05	1,16	1	76,14	RT e RS
45	70	65	5	23,1	10	6,7	-3,3	1,03	1,21	1	70,98	RT e RS
45	70	65	6	24,2	10	7,9	-2,1	1,06	1,23	1	67,23	RT e RS
45	80	45	1	24,5	10	8,7	-1,3	1,21	1,10	0	64,66	Não apresentou
45	80	45	2	23,3	10	7,5	-2,5	1,12	1,06	0	67,83	Não apresentou
45	80	45	3	25,0	10	8,2	-1,8	1,05	1,07	0	67,10	Não apresentou

Continua

45	80	45	4	23,7	10	7,6	-2,4	1,09	1,06	0	67,84	Não apresentou
45	80	45	5	23,5	10	7,2	-2,8	1,14	1,06	0	69,43	Não apresentou
45	80	45	6	24,3	10	7,5	-2,5	1,05	1,06	0	69,20	Não apresentou
45	80	55	1	16,2	10	9,3	-0,7	1,16	1,06	0	42,77	Não apresentou
45	80	55	2	19,3	10	8,6	-1,4	1,21	1,06	0	55,42	Não apresentou
45	80	55	3	21,3	10	8,5	-1,5	1,3	1,06	0	60,08	Não apresentou
45	80	55	4	23,4	10	6,9	-3,1	1,01	1,04	0	70,31	Não apresentou
45	80	55	5	23,8	10	6,6	-3,4	0,99	1,04	0	72,38	Não apresentou
45	80	55	6	23,8	10	6,8	-3,2	0,98	1,04	0	71,22	Não apresentou
45	80	65	1	20,5	10	6,7	-3,3	1,35	1,05	0	67,34	Não apresentou
45	80	65	2	20,5	10	6,7	-3,3	1,34	1,05	0	67,55	Não apresentou
45	80	65	3	20,6	10	6,8	-3,2	1,32	1,04	0	67,08	Não apresentou
45	80	65	4	21,6	10	6,7	-3,3	1,08	1,03	0	68,97	Não apresentou
45	80	65	5	21,8	10	6,6	-3,4	1	1,02	0	69,80	Não apresentou
45	80	65	6	21,0	10	6,0	-4,0	1,07	1,01	0	71,43	Não apresentou
45	90	45	1	17,0	10	11,2	1,2	1,1	1,12	0	34,38	Não apresentou
45	90	45	2	17,0	10	11,0	1,0	1,13	1,12	0	35,37	Não apresentou
45	90	45	3	15,6	10	9,8	-0,2	1,28	1,11	0	37,18	Não apresentou
45	90	45	4	15,9	10	12,3	2,3	1,4	1,13	1	22,80	RT
45	90	45	5	16,4	10	12,5	2,5	1,28	1,13	1	24,03	RT
45	90	45	6	16,0	10	12,3	2,3	1,27	1,12	1	22,92	RT
45	90	55	1	23,7	10	7,7	-2,3	1,01	1,21	0	67,53	Não apresentou
45	90	55	2	23,4	10	8,2	-1,8	1,1	1,23	0	64,90	Não apresentou
45	90	55	3	24,3	10	8,2	-1,8	1,03	1,23	0	66,36	Não apresentou
45	90	55	4	24,0	10	9,4	-0,6	1,19	1,25	0	60,64	Não apresentou
45	90	55	5	25,1	10	9,9	-0,1	1,16	1,27	0	60,47	Não apresentou
45	90	55	6	22,8	10	9,2	-0,8	1,23	1,24	0	59,76	Não apresentou
45	90	65	1	24,2	10	8,5	-1,5	1,05	1,23	0	64,96	Não apresentou
45	90	65	2	24,9	10	9,2	-0,8	1,04	1,24	0	63,22	Não apresentou
45	90	65	3	34,6	10	9,3	-0,7	1,13	1,42	0	73,21	Não apresentou
45	90	65	4	24,2	10	8,3	-1,7	1,06	1,23	0	65,85	Não apresentou
45	90	65	5	24,8	10	8,5	-1,5	1,07	1,24	0	65,67	Não apresentou
45	90	65	6	22,4	10	9,1	-0,9	1,4	1,27	0	59,53	Não apresentou
50	70	45	1	20,2	10	8,2	-1,8	1,32	1,21	1	59,55	Empenamento
50	70	45	2	21,2	10	7,5	-2,5	1,22	1,21	1	64,49	Empenamento
50	70	45	3	31,2	10	7,8	-2,2	1,24	1,40	1	74,87	Empenamento
50	70	45	4	21,6	10	7,3	-2,7	1,17	1,21	1	66,11	Empenamento
50	70	45	5	21,9	10	8,0	-2,0	1,28	1,23	1	63,48	Empenamento
50	70	45	6	17,0	10	8,1	-1,9	1,19	1,13	1	52,27	Empenamento
50	70	55	1	22,2	10	8,0	-2,0	1,19	1,22	1	64,04	RT e RS + empenamento

Continua

50	70	55	2	21,3	10	7,6	-2,4	1,23	1,21	1	64,50	RT e RS + empenamento
50	70	55	3	23,1	10	7,9	-2,1	1,11	1,22	1	65,63	RT e RS + empenamento
50	70	55	4	20,8	10	8,0	-2,0	1,2	1,20	1	61,35	RT e RS + empenamento
50	70	55	5	20,9	10	7,8	-2,2	1,35	1,23	1	62,96	RT e RS + empenamento
50	70	55	6	20,7	10	7,5	-2,5	1,26	1,21	1	63,74	RT e RS + empenamento
50	70	65	1	21,8	10	8,4	-1,6	1,28	1,35	1	61,30	RT e empenamento
50	70	65	2	22,2	10	8,6	-1,4	1,3	1,38	1	61,39	RT e empenamento
50	70	65	3	22,0	10	8,0	-2,0	1,2	1,21	1	63,68	RT e empenamento
50	70	65	4	21,1	10	8,4	-1,6	1,27	1,32	1	60,27	RT e empenamento
50	70	65	5	21,1	10	8,2	-1,8	1,3	1,37	1	61,15	RT e empenamento
50	70	65	6	20,4	10	7,9	-2,1	1,32	1,22	1	61,21	RT e empenamento
50	80	45	1	23,2	10	8,6	-1,4	1,2	1,24	1	62,97	Empenamento
50	80	45	2	25,2	10	8,5	-1,5	1,04	1,24	1	66,35	Empenamento
50	80	45	3	27,1	10	8,6	-1,4	1,01	1,26	1	68,37	Empenamento
50	80	45	4	33,9	10	7,8	-2,2	1,25	1,45	1	76,94	Empenamento
50	80	45	5	29,1	10	7,4	-2,6	1,01	1,29	1	74,45	Empenamento
50	80	45	6	24,1	10	7,8	-2,2	1,07	1,23	1	67,63	Empenamento
50	80	55	1	22,3	10	8,2	-1,8	1,34	1,26	1	63,19	RT e empenamento
50	80	55	2	22,7	10	7,3	-2,7	1,24	1,24	1	67,69	RT e empenamento
50	80	55	3	22,4	10	7,3	-2,7	1,28	1,24	1	67,23	RT e empenamento
50	80	55	4	20,0	10	7,8	-2,2	1,42	1,22	1	61,05	RT e empenamento
50	80	55	5	21,2	10	7,4	-2,6	1,27	1,22	1	65,10	RT e empenamento
50	80	55	6	20,9	10	7,4	-2,6	1,35	1,23	1	64,53	RT e empenamento
50	80	65	1	25,1	10	8,0	-2,0	1,31	1,30	1	67,99	Empenamento
50	80	65	2	22,3	10	5,4	-4,6	1,18	1,22	1	75,65	Empenamento
50	80	65	3	20,6	10	3,8	-6,2	1,3	1,21	1	81,62	Empenamento
50	80	65	4	21,4	10	6,8	-3,2	1,52	1,26	1	68,35	Empenamento
50	80	65	5	26,7	10	12,0	2,0	1,64	1,42	1	54,96	Empenamento
50	80	65	6	20,0	10	5,5	-4,5	1,42	1,22	1	72,30	Empenamento
50	90	45	1	33,9	10	18,0	8,0	1,69	2,01	1	46,90	RT e RS + empenamento
50	90	45	2	31,2	10	18,9	8,9	1,69	1,54	1	39,42	RT e RS + empenamento
50	90	45	3	30,3	10	16,0	6,0	1,84	1,57	1	47,19	RT e RS + empenamento
50	90	45	4	34,4	10	21,4	11,4	1,49	1,55	1	37,80	RT e RS + empenamento
50	90	45	5	35,1	10	23,6	13,6	1,4	1,53	1	32,77	RT e RS + empenamento
50	90	45	6	34,9	10	22,4	12,4	1,45	1,55	1	35,84	RT e RS + empenamento
50	90	55	1	31,4	10	11,1	1,1	1,47	1,48	1	64,82	RT e RS
50	90	55	2	35,0	10	11,9	1,9	1,39	1,53	1	65,84	RT e RS
50	90	55	3	34,9	10	12,5	2,5	1,45	1,55	1	64,22	RT e RS
50	90	55	4	23,7	10	8,7	-1,3	1,77	1,37	1	63,33	RT e RS
50	90	55	5	26,1	10	8,9	-1,1	1,71	1,42	1	65,77	RT e RS

Continua

50	90	55	6	28,0	10	9,6	-0,4	1,71	1,47	1	65,69	RT e RS
50	90	65	1	31,4	10	11,1	1,1	1,42	1,46	1	64,75	RT e RS
50	90	65	2	33,5	10	11,7	1,7	1,41	1,50	1	65,02	RT e RS
50	90	65	3	32,4	10	11,3	1,3	1,52	1,52	1	65,09	RT e RS
50	90	65	4	28,6	10	10,5	0,5	1,66	1,47	1	63,14	RT e RS
50	90	65	5	34,3	10	13,4	3,4	1,67	2,01	1	60,86	RT e RS
50	90	65	6	33,3	10	12,6	2,6	1,75	2,02	1	62,13	RT e RS

TI = Temperatura inicial; URI = Umidade relativa inicial; URF = Umidade realtiva final; Rep = Repetições;  
 UIM = Umidade inicial da madeira; UMO = Umidade final do micro-ondas; UFM = umidade final real da  
 Madeira; TS = Tempo de secagem.