ELIO JOSÉ SANTINI

Ao Jorge Matos, com a admiração do amigo. Hélio Santini Curitiba, 29/11/96

ALTERNATIVAS PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM DE MADEIRA SERRADA EM ESTUFA

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de "Doutor em Ciências Florestais".

Orientador: Prof. Ivan Tomaselli

CURITIBA
1996

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a argüição da Tese de DOUTORADO, apresentada pelo candidato **ELIO JOSÉ SANTINI**, sob o título **"ALTERNATIVAS PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM DE MADEIRA SERRADA EM ESTUFA"**, para obtenção do grau de **Doutor** em Ciências Florestais, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Área de Concentração **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato são de parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Tese, com média final:(9,2), correspondente ao conceito:(A).

Curitiba, 25 de outubro de 1996

Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowski
Primeiro Examinador
ESALQ

Pesq. Dr. Alfredo Souza Mendes
Segundo Examinador
MCT

Prof. Dr. Sidon keinert Junior
Terceiro Examinador
UFPR

Prof. Dr. João Carlos Moreschi
Quarto Examinador
UFPR

Prof. Dr. Ivan Tomaselli
Orientador e Presidente da Banca
UFPR

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO - U.F.PR. - Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal - MESTRADO DOUTORADO - Setor de Ciências Agrárias

À minha esposa JUSSARA

Às minhas filhas RENATA

e

MANUELA

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Ivan Tomaselli, pela orientação, sugestões, estímulo e amizade.

Ao Professor Sidon Keinert Junior, pela co-orientação e sugestões apresentadas.

À Universidade Federal de Santa Maria, que concedeu o afastamento para realização do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal na Universidade Federal do Paraná.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, pela aceitação na Área de Concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Ao Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais do Setor de Ciências Agrárias, pelo auxílio material, financeiro e de pessoal em todas as fases do projeto.

Ao Departamento de Eletricidade do Setor de Tecnologia, especialmente aos Professores Márlio José do Couto Bonfim e Oscar da Costa G. Filho, pelo apoio técnico.

Ao Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, na pessoa do seu presidente, Professor João Carlos Moreschi, pelo auxílio financeiro para aquisição do material de estudo e manutenção do equipamento.

À empresa Forex S.A. pelo fornecimento do material de estudo.

Ao Professor Jorge Luís Monteiro de Matos, pela amizade e valioso auxílio na fase experimental e de processamento dos dados.

Ao Engenheiro Eletricista Fábio Eduardo Scarabelot, principal responsável pela instalação do sistema de automação da estufa de secagem, pelo senso de responsabilidade, desprendimento e dedicação ao projeto.

Ao Professor Henrique Soares Koehler, pelas valiosas contribuições.

Aos funcionários que auxiliaram na preparação do material, em particular aos senhores Ricardo Klitzke, Ademir Cavalli, Vitor Herrera e Antônio Perin.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais, bem como aos colegas pós-graduandos, que emprestaram sua amizade e apoio durante a realização deste Curso.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a consecução deste trabalho, e tiveram seus nomes aqui omitidos.

BIOGRAFIA

ELIO JOSÉ SANTINI, filho de Eurélio Santini e Ana Carolina Tascheto Santini, nasceu em Cacequi, Estado do Rio Grande do Sul, em 21 de agosto de 1949.

Concluiu o Curso Primário em 1963 no Grupo Escolar Coronel Pillar; o Curso Ginasial em 1967 no Ginásio Estadual Padre Caetano Pagliuca; e o Curso Secundário em 1971 no Colégio Estadual Professora Maria Rocha, em Santa Maria.

Em 1972 iniciou o Curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Santa Maria, graduando-se em julho de 1976.

Em 1977 ingressou na Universidade Federal de Santa Maria como Professor de Tecnologia da Madeira, onde atualmente ocupa o cargo de Professor Adjunto IV.

Entre 1979 e 1981 realizou o Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal na Universidade Federal do Paraná, onde obteve o título de Mestre em Ciências Florestais - M.Sc. na Área de Concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Em 1992 iniciou o Programa de Doutorado no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, o qual é concluído com o presente trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS x

LISTA DE TABELAS xiv

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS xvi

RESUMO xviii

ABSTRACT xix

1. INTRODUÇÃO 1

OBJETIVOS 2

2. REVISÃO DE LITERATURA 4

2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA RELACIONADAS COM SUA SECAGEM 4

2.1.1. Aspectos físicos da secagem de madeira 4

2.1.1.1. Movimento capilar da água na madeira 5

2.1.1.2. Difusão da água na madeira 8

2.1.1.3. Secagem da madeira como um fenômeno de difusão 10

2.1.2. Propriedades térmicas da madeira 11

2.1.2.1. Calor específico 12

2.1.2.2. Condutividade térmica 13

2.1.2.3. Difusividade térmica 15

2.1.2.4. Expansão térmica 17

2.1.3. Propriedades elétricas da madeira 18

2.1.3.1. Corrente contínua 18

2.1.3.2. Corrente alternada 21

2.2. PROCESSOS DE SECAGEM DE MADEIRA SERRADA E EQUIPAMENTOS BÁSICOS 27

2.2.1. Secagem a baixa temperatura 28

2.2.2. Secagem convencional 32
2.2.3. Secagem a alta temperatura 33
2.2.4. Secagem a vácuo 35
2.3. VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NO CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM 36
2.3.1. Temperatura e umidade relativa do ar 36
2.3.2. Sistema de ventilação e umidificação 40
2.3.3. Velocidade do ar 42
2.3.4. Umidade da madeira 44
2.4. INSTRUMENTAÇÃO DE CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM EM ESTUFA 45
2.4.1. Medição da temperatura 45
2.4.2. Medição da umidade relativa do ar 47
2.4.3. Medição da umidade de equilíbrio 48
2.4.4. Medição da velocidade do ar 48
2.4.5. Medição da umidade da madeira dentro da estufa 49
2.4.5.1. Pesagem de amostras 50
2.4.5.2. Pesagem da carga de madeira 53
2.4.5.3. Medidores elétricos tipo resistência ou condutância elétrica 55
2.4.5.4. Medidores dielétricos capacitivos 60
2.4.5.5. Medidores dielétricos tipo perda de potência 63
2.5. EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM 66
2.5.1. Sistema de controle manual 66
2.5.2. Sistema de controle semi-automático 67
2.5.3. Sistema de controle completamente automático 68
2.6. PESQUISAS RECENTES SOBRE SISTEMAS ALTERNATIVOS DE CONTROLE 70
2.6.1. Monitoramento das condições da estufa através de sistema de aquisição de dados 70
2.6.2. Monitoramento do teor de umidade da madeira 74
2.6.2.1. Variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL) 74
2.6.2.2. Temperatura da madeira 77
2.6.3. Outros sistemas de monitoramento 80

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DO PROCESSO DE SECAGEM DA MADEIRA 83

3.1.1. Microcomputador com software residente 83

3.1.2. Unidade de controle e aquisição de dados 84

3.1.2.1. Descrição e características técnicas dos elementos de coleta de dados 85

3.1.3. Estufa de secagem da madeira 87

3.2. TESTES PRELIMINARES 88

3.2.1. Material utilizado e preparação das amostras 88

3.2.2. Equipamento de secagem 88

3.2.3. Medição das variáveis 89

3.3. EXPERIMENTO PRINCIPAL 91

3.3.1. Estufa piloto 91

3.3.2. Coleta e preparo do material 92

3.3.2.1. Local de coleta 92

3.3.2.2. Confecção das amostras e determinação da umidade da madeira 93

3.3.2.3. Empilhamento da madeira 93

3.3.3. Métodos de secagem da madeira 95

3.3.3.1. Programas de secagem utilizados 95

3.3.3.2. Velocidade de circulação do ar 97

3.3.4. Métodos de monitoramento do teor de umidade da madeira 98

3.3.4.1. Pesagem da carga de madeira 98

3.3.4.2. Medidores elétricos 98

3.3.4.3. Variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL) 100

3.3.4.4. Temperatura da madeira 100

3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA 101

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 102

4.1. TESTES PRELIMINARES CONDUZIDOS EM ESTUFA DE LABORATÓRIO 102

4.1.1. Correlação entre teor de umidade e resistência elétrica da madeira 102

4.1.2. Correlação entre teor de umidade e temperatura da madeira 104

4.1.3. Correlação entre teor de umidade, resistência elétrica e temperatura da madeira 106

4.2. EXPERIMENTO PRINCIPAL CONDUZIDO EM ESTUFA PILOTO 108
4.2.1. Condução do processo de secagem 108
4.2.1.1. Condições internas da estufa 108
4.2.1.2. Curvas de secagem 110
4.2.1.3. Dispersão dos dados 113
4.3. CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DE UMIDADE E AS VARIÁVEIS ESTUDADAS 114
4.3.1. Variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL) 114
4.3.1.1. Importância da TDAL para o controle do processo de secagem 114
4.3.1.2. Relação entre TDAL e taxa de secagem 114
4.3.1.3. Variáveis que influem na relação TDAL/teor de umidade da madeira 117
4.3.1.4. Influência da temperatura de secagem na TDAL 123
4.3.2. Temperatura da madeira 124
4.3.2.1. Influência do teor de umidade na temperatura da madeira 125
4.3.2.2. Influência da velocidade do ar na relação temperatura da madeira/teor de umidade 131
4.3.3. Coeficiente temperatura da madeira/temperatura do bulbo úmido (TM/TBU) 136
4.3.4. Resistência elétrica da madeira 143
4.3.4.1. Efeito do teor de umidade da madeira 144
4.3.4.2. Influência da temperatura de secagem 147
4.4. AJUSTE DE MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA 149
4.4.1. Modelos de regressão que incorporam a TDAL 149
4.4.2. Modelos de regressão que incorporam a temperatura da madeira 152
4.4.3. Modelos de regressão que incorporam o coeficiente TM/TBU 155
4.4.4. Modelos de regressão que incorporam a resistência elétrica da madeira 157
4.5. AVALIAÇÃO TÉCNICO-OPERACIONAL DOS SISTEMAS ESTUDADOS 161
4.5.1. Sistemas convencionais 161
4.5.2. Sistemas não convencionais 162

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 167
ANEXOS 170
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 188

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1	MOVIMENTO DA ÁGUA EM CAPILARES	7
2	SIGNIFICADO DOS TERMOS USADOS NA LEI DE FOURIER	14
3	RELAÇÃO ENTRE CONSTANTE DIELÉTRICA ε E O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA A UMA FREQUÊNCIA DE 2MHz	24
4	DISTRIBUIÇÃO DE AMOSTRAS DE CONTROLE EM UMA PILHA DE MADEIRA	51
5	MÉTODO DE CONFECÇÃO DE UMA AMOSTRA DE CONTROLE	52
6	MÉTODO DE PESAGEM DA CARGA DE MADEIRA ATRAVÉS DE CÉLULA DE CARGA (ADAPTADO DE SCHNEIDER et al.,1979)	55
7	MONITORAMENTO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA COM MEDIDORES ELÉTRICOS RESISTIVOS	60
8	MONITORAMENTO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA COM MEDIDORES DIELÉTRICOS CAPACITIVOS	62
9	RELAÇÃO ENTRE TEOR DE UMIDADE VERDADEIRO E AS LEITURAS DO MEDIDOR TIPO PERDA DE POTÊNCIA	64
10	ESTUFA TÍPICA DE SECAGEM DE MADEIRA	72
11	DIAGRAMA PARA AUTOMAÇÃO DA ESTUFA DE SECAGEM USANDO COMPUTADOR E EQUIPAMENTO BÁSICO DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS	73
12	VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA PILHA DE MADEIRA (TDAL)	75
13	SISTEMA COMPUTADORIZADO PARA GERENCIAMENTO DO PROCESSO DE SECAGEM	83
14	FLUXOGRAMA DO SOFTWARE DE CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM	85
15	EQUIPAMENTO DE SECAGEM E TÉCNICAS DE MEDIÇÕES USADAS NOS TESTES PRELIMINARES	89

16 POSICIONAMENTO DOS SENSORES PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA (A), TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA (B) E TEMPERATURA DA ESTUFA (C) DURANTE OS TESTES PRELIMINARES 91
17 ESTUFA PILOTO USADA NO EXPERIMENTO PRINCIPAL 92
18 METODOLOGIA DE CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS DE SECAGEM E SEÇÕES DE UMIDADE 94
19 EMPILHAMENTO DA MADEIRA 94
20 APARATO UTILIZADO PARA PESAGEM DA CARGA DE MADEIRA 99
21 DISPOSIÇÃO DOS CINCO SENSORES UTILIZADOS PARA MONITORAR A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA PILHA DE MADEIRA 100
22 TEOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DO LOGARITMO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA (LnR) ABAIXO DO PONTO DE SATURAÇÃO DAS FIBRAS TEÓRICO (TESTES PRELIMINARES) 104
23 CORRELAÇÕES OBTIDAS NOS TESTES PRELIMINARES ENTRE TEOR DE UMIDADE E TEMPERATURA DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII*, MEDIDA A ¼ DA ESPESSURA, PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM (N = NÚMERO DE OBSERVAÇÕES) 106
24 CONDIÇÕES DE TEMPERATURA DA ESTUFA DE SECAGEM PARA OS PROGRAMAS DE 50 E 110°C E DUAS VELOCIDADES DE AR (TBS= TEMPERATURA DO BULBO SECO; TBU=TEMPERATURA DO BULBO ÚMIDO; TAT=TEMPERATURA ANTES DO TROCADOR DE CALOR; TDT=TEMPERATURA DEPOIS DO TROCADOR DE CALOR) 109
25 CURVAS DE SECAGEM PARA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* COM 25 MM DE ESPESSURA SUBMETIDA À QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR 111
26 CURVAS DE SECAGEM PARA A MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* COM 25 MM DE ESPESSURA SUBMETIDA ÀS TEMPERATURAS DE 50 E 110°C E DUAS VELOCIDADES DE AR 112
27 RELAÇÃO ENTRE TDAL E TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE PARA A MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* NAS TEMPERATURAS DE 110 E 50°C E VELOCIDADE DO AR DE 5,0 M/S 115

28 CORRELAÇÃO ENTRE TAXA DE SECAGEM E TDAL PARA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* SUBMETIDA ÀS TEMPERATURAS DE 110°C E 50°C E VELOCIDADE DO AR DE 5,0 M/S 116
29 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE SECAGEM NA RELAÇÃO ENTRE TDAL E TEOR DE UMIDADE PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E VELOCIDADE DO AR DE 2,3 M/S 118
30 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR NA RELAÇÃO ENTRE TDAL E TEOR DE UMIDADE PARA AS TEMPERATURAS DE 50°C E 110°C 122
31 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR NA RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DE SECAGEM E A TDAL (MÉDIA DAS ÚLTIMAS DEZ OBSERVAÇÕES) 122
32 CURVAS TÍPICAS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NUMA PILHA DE MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII*, COM 150 CM DE LARGURA, PARA QUATRO ESTÁGIOS DE TEOR DE UMIDADE, SECAGEM A ALTA TEMPERATURA (110°C) E VELOCIDADE DO AR DE 2,3 M/S 124
33 RELAÇÃO ENTRE TEOR DE UMIDADE E TEMPERATURA DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII*, MEDIDA A ¼ DA ESPESSURA, PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR 126
34 VARIAÇÃO NA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII*, MEDIDA A ¼ DA ESPESSURA DE 25 MM, DURANTE A SECAGEM A 110°C COM E SEM CIRCULAÇÃO DE AR 131
35 EFEITO DA VELOCIDADE DO AR NA RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DE SECAGEM E DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII*, MEDIDA A ¼ DA ESPESSURA (MÉDIA DAS ÚLTIMAS DEZ OBSERVAÇÕES) 134
36 COEFICIENTE TM/TBU EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII*, PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR 138
37 COEFICIENTE TM/TBU EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE PARA DUAS TEMPERATURAS DE SECAGEM (50 E 110°C) E DUAS VELOCIDADES DE AR (2,3 E 5,0 M/S) 139

38 COEFICIENTE TM/TBU EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA FAIXA DE 30 A 10% PARA AS QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR 141
39 CURVA TÍPICA PARA A RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA ELÉTRICA E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* SUBMETIDA A SECAGEM EM ESTUFA COM CIRCULAÇÃO DE AR 145
40 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE SECAGEM NA RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA (LnR) E TEOR DE UMIDADE 148
41 CURVAS DE SECAGEM ESTIMADAS PARA MADEIRA SERRADA DE *PINUS ELLIOTTII*, ATRAVÉS DE MODELOS DE REGRESSÃO E PELO MÉTODO DE PESAGEM DA CARGA, PARA DUAS TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR 163

LISTA DE TABELAS

TABELA		PÁGINA
1	PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADO PARA A TEMPERATURA DE 50°C	95
2	PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADO PARA A TEMPERATURA DE 70°C	96
3	PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADO PARA A TEMPERATURA DE 90°C	96
4	PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADO PARA A TEMPERATURA DE 110°C	97
5	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* ABAIXO DO PSFt (TESTES PRELIMINARES)	103
6	CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA E TEOR DE UMIDADE PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM (TESTES PRELIMINARES)	105
7	MODELOS DE EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA ESTIMAR O TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA TEMPERATURA DA MADEIRA E LOGARITMO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA	107
8	NÚMERO DE OBSERVAÇÕES, TEOR DE UMIDADE E TEMPO DE SECAGEM PARA OS QUATRO PROGRAMAS DE TEMPERATURA E DUAS VELOCIDADES DE AR	112
9	CORRELAÇÃO ENTRE TDAL E TEOR DE UMIDADE PARA A FAIXA DE UMIDADE DESDE VERDE ATÉ 10% E EQUAÇÕES RESULTANTES	119
10	CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DA MADEIRA E TEOR DE UMIDADE PARA A FAIXA DE UMIDADE DESDE VERDE ATÉ 10% E EQUAÇÕES RESULTANTES	127
11	CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DA MADEIRA E TEOR DE UMIDADE NO INTERVALO ENTRE O PSFt E 10%, E EQUAÇÕES RESULTANTES	129
12	CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE TM/TBU E O TEOR DE UMIDADE PARA A FAIXA DESDE VERDE ATÉ 10% DE UMIDADE E EQUAÇÕES RESULTANTES	140

13 CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE TM/TBU E O TEOR DE UMIDADE PARA A FAIXA ENTRE 30 E 10% DE UMIDADE E EQUAÇÕES RESULTANTES 142
14 CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA ELÉTRICA E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA NA FAIXA ENTRE 30 E 10% DE UMIDADE E EQUAÇÕES RESULTANTES 146
15 MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA A PARTIR DA TDAL PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR 151
16 MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA TEMPERATURA DA MADEIRA PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR 153
17 MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA TEMPERATURA DA MADEIRA, PARA AS TEMPERATURAS DE SECAGEM DE 90 E 110°C E DUAS VELOCIDADES DE AR, NO INTERVALO ENTRE O PSFt E 10% 154
18 MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DO COEFICIENTE TM/TBU PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR 156
19 MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E VELOCIDADE DE AR DE 2,3 M/S 158
20 MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E VELOCIDADE DE AR DE 5,0 M/S 159

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	ANALOG/DIGITAL CONVERTER (conversor analógico/digital)
ASD	ADJUSTABLE SPEED DRIVE (mecanismo de velocidade ajustável)
BTU/h	BRITISH THERMAL UNITY/HOUR (unidade térmica britânica/hora)
DAQ	DATA-ACQUISITION AND CONTROL (controle e aquisição de dados)
e	EXPONENCIAL
F	VALOR DE F CALCULADO
GHz	GIGAHERTZ (10^9 Hz)
HP	HORSE POWER (cavalo vapor)
I/P	ELECTRONIC/PNEUMATIC CONVERTER (conversor eletrônico pneumático)
LnR	LOGARITMO NATURAL DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA
Lntu	LOGARITMO NATURAL DO TEOR DE UMIDADE
N	NÚMERO DE OBSERVAÇÕES
NMR	NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE (ressonância magnética nuclear)
Pa	PESO ATUAL DA MADEIRA
PLC	PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER(controlador lógico programável)
Ps	POTENCIAL DE SECAGEM
PSF	PONTO DE SATURAÇÃO DAS FIBRAS
PSFt	PONTO DE SATURAÇÃO DAS FIBRAS TEÓRICO
Pu	PESO ÚMIDO OU INICIAL
R	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO
R^2	COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO
RTD	RESISTANCE TEMPERATURE DETECTOR (detector de temperatura por resistência)
SQRT	SQUARE ROOT (raíz quadrada)
Syx	ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA
TAT	TEMPERATURA ANTES DO TROCADOR DE CALOR
TBS	TEMPERATURA DO BULBO SECO

TBU	TEMPERATURA DO BULBO ÚMIDO
TDAL	TEMPERATURE DROP ACROSS THE LOAD (variação da temperatura na pilha de madeira)
TDT	TEMPERATURA DEPOIS DO TROCADOR DE CALOR
Tm	TEMPERATURA DA MADEIRA
TM/TBU	COEFICIENTE TEMPERATURA DA MADEIRA/TEMPERATURA DO BULBO ÚMIDO
TS	TEMPERATURA DE SECAGEM
TU	TEOR DE UMIDADE
TUa	TEOR DE UMIDADE ATUAL
TUI	TEOR DE UMIDADE INICIAL
TUF	TEOR DE UMIDADE FINAL
UDC	UNIVERSAL DIGITAL CONTROLLER (controlador digital universal)
UE	UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA
UFPR	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
UR	UMIDADE RELATIVA DO AR
V	VELOCIDADE DO AR

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo investigar algumas alternativas tecnológicas não convencionais e sua aplicação no monitoramento e controle do processo de secagem de madeira serrada. Para tanto, oito cargas de madeira serrada de *Pinus elliottii* Engelm com 25 mm de espessura foram submetidas a quatro temperaturas de secagem (50, 70, 90 e 110°C) e duas velocidades de ar (2,3 e 5,0 m/s), utilizando-se uma estufa piloto dotada de circulação forçada de ar e controle completo das condições internas. O teor de umidade considerado como padrão de comparação, foi obtido através da pesagem contínua da pilha de madeira, a partir do sinal oriundo de uma célula de carga.

Para gerenciar o processo de secagem utilizou-se um software específico, residente em um microcomputador, com funções de comandar o hardware, ler os sensores, processar e registrar os dados e executar os acionamentos da estufa com base no programa de secagem. A coleta de dados e controle das condições da estufa durante o processamento da madeira foi efetuado por um sistema constituído de 32 canais, comandado pelo software. As leituras do peso de carga realizadas por um desses canais, possibilitaram o cálculo do teor de umidade usado pelo sistema para mudar as fases do programa e encerrar o processo.

Testes preliminares conduzidos em estufa de convecção natural e sem controle de umidade relativa, em que correlações entre teor de umidade, temperatura interna da madeira e resistência elétrica da madeira foram estabelecidas, permitiram comparações com o experimento principal realizado numa estufa piloto de convecção forçada.

No experimento principal, os resultados mostraram uma boa correlação entre a variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL) e teor de umidade apenas para o processo de secagem a alta temperatura, sendo os maiores coeficientes encontrados para a velocidade do ar de 5,0 m/s. Modelos que incluem a temperatura do bulbo úmido explicaram melhor a relação entre as duas variáveis. O valor da TDAL aumentou com a temperatura de secagem, e a 110°C foi drasticamente reduzido com o aumento da velocidade do ar.

A correlação entre temperatura interna da madeira, medida a ¼ de sua espessura, e o teor de umidade desde verde (>100%) até 10%, foi maior para a temperatura de 110°C que para as demais, mas foi inferior a encontrada nos testes preliminares, provavelmente devido ao efeito dos fatores que controlam as condições da estufa.

A boa correlação ($0,97 \leq R \leq 0,99$) encontrada entre resistência elétrica da madeira e teor de umidade na faixa entre aproximadamente 30 e 10%, a qual foi semelhante à obtida nos testes preliminares, e o bom ajuste dos modelos exponenciais para as quatro temperaturas de secagem, comprovam que este método fornece estimativas confiáveis do teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras.

O emprego do coeficiente temperatura interna da madeira/temperatura do bulbo úmido (TM/TBU) para estimar o teor de umidade da madeira, parece promissor. A boa correlação entre as duas variáveis ($0,94 \leq R \leq 0,98$) e o ajuste satisfatório dos modelos de regressão, evidenciam que o coeficiente TM/TBU apresenta boas perspectivas de uso para monitoramento do processo.

A avaliação técnica e operacional dos sistemas estudados, além de constatar a importância dos métodos convencionais, destaca as possibilidades promissoras de alternativas como a TDAL, temperatura interna da madeira e coeficiente TM/TBU para o controle do processo de secagem de madeiras.

ABSTRACT

This study was carried out to investigate alternative technologies to facilitate monitoring and control of the wood drying process. Eight loads of 25 mm thick *Pinus elliottii* boards were dried usingt four temperatures (50, 70, 90 and 110°C) and two air velocities (2.3 and 5.0 m/s). A pilot kiln, with full control of the drying conditions was utilized. Continuous weight of the stack was used to calculate the actual moisture content.

A computer, having a specially developed software, was used to collect the required information and to control the kiln, based on pre established drying schedules. The system had 32 channels, and was fully integrated to the software. By reading information on the load weight it was calculated the average moisture content of the load and was used to follow all schedule steps and finalize the process.

Preliminary tests were carried out using a laboratory oven, with natural convection and no relative humidity control. In the preliminary tests it was established correlations between moisture content determined by weight, internal temperature of the wood and the moisture content determined based on the electric resistivity. The data obtained in the laboratory oven was compared with the data collected in the pilot kiln, were all drying variables were controlled.

The results of the main experiment showed a good correlation between the temperature drop across the load (TDAL) and the moisture content of the wood when drying was carried out at high temperature (110°C), specially in the case of the higher air velocity (5,0 m/s). Models including also the wet bulb temperature improved the correlation. As a general rule the TDAL increases with the drying temperature, and when drying is carried out a 110°C it is drastically reduced by an increase in the air velocity.

Using the pilot kiln correlation between the internal temperature of the wood, measured at ¼ of the board thickness, and the moisture content (from green to 10% moisture content) was found to be better at 110°C than at the lower temperatures tested. The correlation was found to be better in the oven than in the pilot kiln.

When drying wood between 30% and 10% (below the fiber saturation point), good correlation was obtained between the actual moisture content and the values obtained using the resistive moisture meter (0.97 - R -0.99). This correlation was found to be similar both in the pilot kiln and the laboratory oven. The results point out that the use of exponential model, based on the resistivity, is a good alternative to estimate of moisture content below the fiber saturation.

The utilization of the wood internal temperature/wet bulb temperature ratio is another promising alternative to estimate the wood moisture content. The equations developed presented a good correlation between these variables (0.94 - R - 0.98).

The technical and operational evaluation of the systems studied points out that, besides the traditional system, there are other feasible alternatives to monitor the moisture content in kilns. The alternatives include de temperature drop across the load (TDAL), the wood internal temperature and the wood temperature/wet bulb temperature ratio.

1. INTRODUÇÃO

A importância da secagem para o processamento da madeira pode ser avaliada basicamente pelo consumo energético e pela qualidade do produto final. É geralmente aceito, que da energia total requerida nas diversas fases de produção, em torno de 70% é consumida durante a secagem (MILLER, 1977). Embora técnicas de conservação de energia possam ser utilizadas, a melhoria na qualidade do material seco é uma medida prática que deve ser adotada para compensar o alto custo do processo de secagem, o que pode ser obtido através do emprego de sistemas de controle eficientes.

A informatização do processo de secagem iniciou aproximadamente na metade da década de 80, quando sistemas de controle computadorizados foram introduzidos para suprir as exigências em qualidade e a elevação dos custos da madeira e de energia. Um sistema de aquisição de dados controlado por computador foi desenvolvido por WELLING & RESSEL (1985), com a tarefa de coletar todos os parâmetros envolvidos na secagem, tornando o processo bastante flexível. Até então, as condições de secagem na maioria das estufas comerciais eram monitoradas, e ainda o são em parte, através de equipamentos manuais e semi-automáticos, em que as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido controlam os sistemas de aquecimento, de vaporização e de ventilação, regulando assim o ambiente de secagem.

O sucesso de qualquer sistema de controle para estufas de secagem depende basicamente da precisão de medição do teor de umidade da madeira, sendo que dois métodos são tradicionalmente utilizados para este fim. O uso de amostras de controle, distribuídas em número variável na pilha, é considerado um método eficiente, porém, além de ser destrutivo, é muito trabalhoso e requer a abertura da estufa periodicamente para pesá-las. Os medidores elétricos ou dielétricos fornecem o teor de umidade instantaneamente, mas são considerados confiáveis apenas abaixo do ponto de saturação das fibras. Além disso, como as medições são influenciadas por uma série de variáveis, fatores de correção em função da espécie e temperatura, principalmente, precisam ser introduzidos.

A busca por novas tecnologias de monitoramento do teor de umidade da madeira durante a secagem em estufa se intensificaram na última década, e algumas alternativas tem se mostrado promissoras. Uma delas, a variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL), se baseia no fato que a temperatura do ar diminui ao passar pelos espaços dos separadores,

porque durante a secagem a madeira úmida absorve parte da energia do ar para fazer a transferência de massa. A relação entre esta diferença de temperatura e a taxa de secagem, estabelecida inicialmente por STEVENS & JOHNSTON (1957), forneceu os fundamentos básicos para o uso da TDAL como meio indicativo da finalização da secagem. Atualmente, alguns fabricantes de estufas canadenses estão utilizando-o como um método auxiliar nos sistemas de controle automáticos, porém ainda existem dúvidas sobre sua aplicabilidade para monitoramento contínuo do processo de secagem.

A temperatura da madeira, medida superficial ou internamente, é outra alternativa que tem recebido atenção dos pesquisadores. Trabalhos realizados por KEYLWERTH et al. (1955), TOMASELLI (1977) e mais recentemente por VERMAAS & NEVILLE (1988) confirmaram a boa correlação existente entre temperatura interna e teor de umidade, principalmente para o processo de secagem a alta temperatura. Entretanto, os estudos tem sido conduzidos em peças individuais de madeira e em escala de laboratório, o que na maioria dos casos não corresponde às condições encontradas nas estufas comerciais.

A relação entre temperatura da madeira e a temperatura do bulbo úmido em função do teor de umidade, foi observada por KEYLWERTH (1952) no processo de secagem a alta temperatura. A constatação de que acima do ponto de saturação das fibras a razão entre elas se mantém próximo à unidade, e posteriormente aumenta a medida que o teor de umidade diminui, parece vislumbrar outra alternativa de controle do processo de secagem.

Para avaliar as possibilidades de utilização dessas alternativas no controle do processo de secagem de madeira, estabeleceu-se para presente estudo, os seguintes objetivos:

a) Objetivo geral

- Investigar alternativas tecnológicas não convencionais visando melhorar o monitoramento e controle do processo de secagem de madeira serrada.

b) Objetivos específicos

- Estabelecer correlações entre o teor de umidade, resistência elétrica da madeira e temperatura interna da madeira em testes conduzidos em estufa com convecção natural,

visando sua comparação com o experimento principal conduzido em estufa piloto de convecção forçada, com controle do processo;

- Correlacionar o teor de umidade com a resistência elétrica da madeira, temperatura interna da madeira, variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL) e coeficiente temperatura interna da madeira/temperatura do bulbo úmido (TM/TBU), durante o experimento principal;

- Ajustar modelos de regressão para estimativa do teor de umidade a partir das variáveis estudadas;

- Avaliar a viabilidade técnica e operacional das alternativas de monitoramento estudadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA RELACIONADAS COM SUA SECAGEM

2.1.1. Aspectos físicos da secagem de madeira

A madeira em seu estado natural contém substancial quantidade de água, que varia em função da espécie, entre toras e dentro da própria tábua. As variações na quantidade de água, em tábuas produzidas da mesma tora, são principalmente devido a posição das mesmas na tora da qual foram serradas. Em muitas espécies, o alburno contém muito mais umidade do que o cerne. Além disso, a presença de lenhos diferentes na madeira pode significar diferença de teor de umidade (MACKAY & OLIVEIRA, 1989).

A quantidade de água existente na madeira é conhecida como teor de umidade (TU), o qual é definido como o massa de água existente na madeira, expresso como uma percentagem da massa de madeira completamente seca. Entretanto, para algumas utilizações como combustível (SIMPSON, 1991), e para a indústria de polpa celulósica (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968), o teor de umidade é baseado no peso úmido original.

A compreensão do mecanismo de secagem requer conhecimentos a cerca de alguns aspectos físicos envolvidos na relação água/madeira, como a movimentação interna da umidade e sua evaporação para o ambiente. A água existente na madeira pode ser classificada de duas maneiras (BROWN et al., 1952; KOLLMANN, 1959; CECH & PFAFF, 1977):

- água livre ou capilar, aquela localizada nos lúmens celulares e espaços intercelulares, retida por forças capilares;
- água de impregnação ou higroscópica, aquela que se encontra em camadas polimoleculares nos espaços submicroscópicos da parede celular, ligada por forças elétricas.

Estes dois tipos de água desempenham funções diferenciadas no processo de secagem da madeira. Enquanto que a água capilar é mais importante para as propriedades térmicas e elétricas, a água higroscópica exerce influência principalmente sobre as propriedades mecânicas e algumas propriedades físicas da madeira, como massa específica, contração e inchamento.

Por ocasião da secagem, a primeira água a ser removida é aquela contida nas cavidades celulares, já que as forças que as retém são apreciavelmente menores que aquelas que mantém a água na parede celular (CECH & PFAFF, 1977). A retirada dessa água, além de ocasionar uma diminuição no peso da madeira (RASMUSSEN, 1961), pode provocar também o aparecimento de defeitos, como o colapso, em madeiras propensas (MACKAY & OLIVEIRA, 1989).

O ponto de saturação das fibras (PSF) é o teor de umidade referente ao estado em que, teoricamente, apenas as paredes celulares estão saturadas, ao passo que toda a água capilar já foi eliminada, estando os lúmens e espaços intercelulares sem o líquido. Durante o processo de secagem, água capilar e água de impregnação são removidas, respectivamente, acima e abaixo deste ponto (STEINMANN et al., 1986). De acordo com SKAAR (1972) o PSF varia normalmente entre 25 e 35% de umidade, enquanto que KOLLMANN (1959) afirma que o mesmo pode ser considerado genericamente como sendo 28%. Entretanto, em razão dos inúmeros fatores influentes, KOLLMANN & CÔTÉ (1968) cita que o PSF varia desde 22 a 24% para coníferas com alto conteúdo de resina e folhosas com cerne distinto e porosidade em anel circular, até 32 a 35% para folhosas com porosidade difusa, cerne indistinto, alburno com porosidade em anel circular, e para folhosas com cerne distinto e porosidade em anel semicircular. O PSF é de grande importância prática uma vez que as variações dimensionais começam a se manifestar abaixo do mesmo, e sua determinação pode ser feita através de qualquer um dos nove métodos descritos por STAMM (1971).

Qualquer movimento de água na madeira envolve a permeabilidade de sua estrutura microscópica e submicroscópica. Acima do ponto de saturação das fibras, o interior dos capilares contém água livre, e as moléculas de água adjacentes às paredes do capilar não estão livres, mas impregnadas. O movimento da água livre acima do PSF é causada por forças capilares. Abaixo do PSF, a água higroscópica movimenta-se através das paredes celulares devido a gradientes de umidade estabelecidos transversalmente a elas, e gradientes de pressão de vapor (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

2.1.1.1. Movimento capilar da água na madeira

O movimento capilar, que ocorre acima do ponto de saturação das fibras, é um fenômeno totalmente diferente do movimento realizado abaixo do PSF (HART, 1965). A força

capilar provoca um fluxo de água livre através das cavidades, espaços e pontuações, de uma célula para outra. A medida que a água das cavidades celulares é progressivamente removida, outras forças de secagem começam a operar. A força capilar age no centro da madeira e diminui gradualmente a medida que o teor de umidade das células internas aproxima-se do PSF (CECH & PFAFF, 1977). De acordo com STAMM (1967), o movimento da água acima do PSF é altamente dependente da temperatura, da presença de ar no sistema e do tamanho máximo da abertura da pontuação. HART (1965) afirma que a existência de uma bolha de ar dentro da cavidade celular, devido a pressão do ar mais a pressão de vapor d'água produzidas pelo aquecimento, pressiona a água através das pontuações das células adjacentes, provocando o seu movimento. Assim, o fluxo da água ocorre simplesmente dos lúmens de pressão mais elevada para os de pressão mais baixa. SIAU (1971) menciona que o movimento de água acima do PSF segue a lei de Poiseuille, que considera o fluxo através dos capilares como uma função do raio do capilar elevado na quarta potência. As leis capilares consideram ainda que quanto maior o raio do capilar, menor é a tração da coluna d'água no mesmo, e consequentemente, menor a tensão capilar, o que resulta numa redução do fluxo.

O movimento de água num tubo capilar cheio é produzido por diferenças em tensão devido a forças superficiais nos meniscos dentro dos capilares. A tensão T no menisco balanceado dentro de um capilar com raio interno r, desconsiderando as diferenças em pressão de ar dentro do mesmo, pode ser determinada pela Equação 01 (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968):

$$T = H.d = \frac{2\beta}{d.r} d = \frac{2\beta}{r} \qquad \text{Equação 01}$$

onde,

T = tensão capilar, g/cm^3

H = altura de ascensão do líquido no capilar, cm

d = densidade da água, g/cm^3

r = raio do capilar, cm

β = tensão superficial da água, g/cm

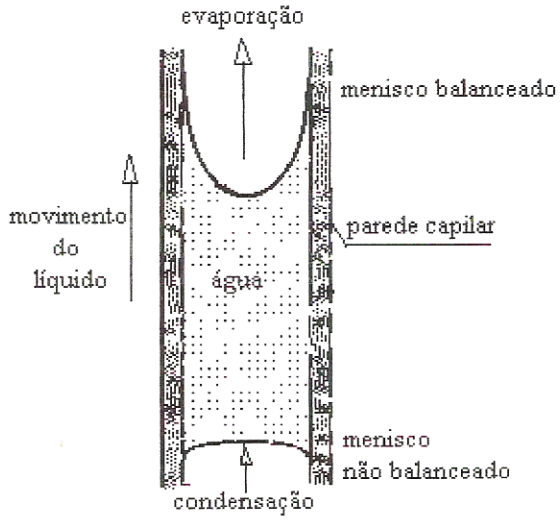
A Equação 01 estabelece que a tensão capilar é diretamente proporcional a tensão superficial da interface ar-água, e inversamente proporcional ao raio da curvatura.

A tensão superficial da água β pode ser estimada a partir da temperatura t, através do modelo:

$$\beta = 0{,}0769(1\text{-}0{,}00225t) \qquad \text{Equação 02}$$

Quando existe dentro de um tubo capilar um menisco balanceado e um não balanceado, como mostrado na Figura 1, o movimento do líquido é provocado pelas diferenças em tensão existente entre estes dois meniscos, já que a pressão de vapor sob uma superfície esférica é menor que a pressão de vapor numa superfície plana. Assim, quando a pressão de vapor diminui com o decréscimo do diâmetro do capilar, a tensão superficial aumenta. Numa rede de tubos capilares de diferentes diâmetros, ocorrem diferentes forças de tensão nos meniscos balanceados. Deste modo, os tubos estreitos tiram líquido dos tubos mais largos.

FIGURA 1 - MOVIMENTO DA ÁGUA EM CAPILARES



Fonte: KOLLMANN & CÔTÉ (1968).

O fluxo capilar é aproximadamente 50 vezes maior na direção longitudinal que na transversal (radial e tangencial), porque neste sentido existe um menor número de obstáculos e menos presença de substâncias que possam obstruir a passagem da água.

O fator mais importante que afeta o fluxo capilar é a permeabilidade da madeira, que de acordo com a lei de Darcy, é obtida através da relação entre o fluxo e o gradiente (SIAU,

1984). Segundo este autor (1971), a permeabilidade transversal das coníferas é 1/20000 dos valores longitudinais, e nas folhosas esta relação não deveria ser muito diferente porque, de modo semelhante, o fluxo ocorre através dos pares de pontuações. A relação entre os fluxos longitudinal e transversal geralmente é muito maior para folhosas que para coníferas, devido à alta condutividade dos vasos.

A condutividade de água, da mesma forma que a condutividade térmica e o coeficiente de difusão, não é constante mesmo para casos específicos, mas depende da distribuição de capilares na substancia, da tensão superficial e da viscosidade do líquido, e do teor de umidade. Para valores mais altos possíveis de teores de umidade, quando todos os vasos estão preenchidos com água, o valor da condutividade de água tende ao infinito. Conforme o teor de umidade aproxima-se de zero, a condutividade de umidade também tende a zero.

2.1.1.2. Difusão da água na madeira

A secagem da madeira abaixo do PSF é considerada como um processo de pura difusão (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968; STAMM, 1967). As moléculas de água movem-se através da parede celular por um gradiente de umidade, através da cavidade celular por um gradiente de pressão de vapor, e novamente através da parede celular mais seca por um gradiente de umidade, e assim sucessivamente, até atingir a superfície da madeira (HART, 1965; CECH & PFAFF, 1977). O fenômeno de difusão é considerado complexo, porque a difusão do vapor d'água através da estrutura vazia e a difusão da água de impregnação através das paredes celulares, ocorrem simultaneamente (STAMM, 1962; KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

O gradiente de pressão de vapor é estabelecido quando grande parte das forças capilares cessam, ficando na maioria das cavidades celulares apenas ar e vapor d'água. O gradiente de pressão, então, faz com que o vapor d'água se movimente das áreas de alta pressão (interior da tábua) para as áreas de baixa pressão de vapor (superfície), passando através das cavidades celulares, câmaras de pontuações, abertura da membrana de pontuação e espaços intercelulares (CECH & PFAFF, 1977; STAMM, 1967).

O gradiente de umidade entre as paredes das células mais externas e internas se desenvolve a medida que a umidade começa evaporar das paredes das células próximas à superfície da peça de madeira. Como a madeira é um material higroscópico, as paredes celulares mais secas da superfície absorvem umidade das paredes mais úmidas, criando um

fluxo de água das células internas da madeira para as externas. Além do massa específica e permeabilidade da madeira, a temperatura também exerce influência na difusão (HART, 1965). A velocidade com que a difusão ocorre do interior para a superfície das tábuas, influi diretamente na taxa de secagem (BROWN & BETHEL, 1975).

O movimento de água abaixo do PSF, quando considerado fluxo constante, é governado pela primeira lei de Fick, que possui uma forma matemática semelhante às leis de Darcy e de Fourier (SIAU, 1984). A primeira lei de Fick representa a relação entre o fluxo e o gradiente de concentração sob condições constantes, e quando aplicada ao transporte de vapor d'água na madeira pode ser expressa da seguinte maneira:

$$D = \frac{w / tA}{\Delta c / L} \qquad \text{Equação 03}$$

onde,

D = coeficiente de difusão água-vapor da madeira, cm^2/s

w = massa de vapor d'água transferido através da madeira no tempo *t*, g

A = área da seção transversal do corpo de prova, cm^2

L = extensão da direção de fluxo, cm

t = tempo, s

Δc = diferença de concentração, g/cm^3

Os valores calculados pela equação da lei de Fick representam aproximadamente o dobro dos valores experimentais no sentido longitudinal e 30 vezes no sentido tangencial da madeira, uma vez que o fluxo não é constante no espaço nem no tempo.

A taxa de difusão da água de impregnação é o produto de um coeficiente de difusão e uma força propulsora. Em pensamento clássico, a força propulsora é um gradiente de concentração, ou mais exatamente, um potencial químico. A difusão é um processo molecular, realizado pelos deslocamentos casuais de moléculas individuais (LANGRISH & WALKER, 1993). Assim, se uma tora de folhosa impermeável é descascada e deixada para secar, a migração de umidade do interior para a superfície é uma função do gradiente de umidade entre o interior úmido e a superfície mais seca.

2.1.1.3. Secagem da madeira como um fenômeno de difusão (WALKER, 1993)

Os perfis de umidade em qualquer estágio de secagem, i.e. depois que a mesma proporção de umidade tenha sido perdida, depende da permeabilidade da madeira. No caso de alburno altamente permeável, o movimento de umidade é dominado pelo fluxo de massa, enquanto que uma madeira impermeável precisa secar apenas por difusão. Quanto mais permeável a madeira mais rápida ela seca acima do PSF, uma vez que o fluxo de massa é possível.

Com uma madeira permeável o fluxo de líquido pode manter a superfície acima do PSF durante algum tempo, e enquanto a superfície da madeira estiver úmida, a taxa de secagem é controlada pela taxa de transferência de calor do ar para a madeira. A taxa de secagem é proporcional a taxa de transferência de calor, que por sua vez é proporcional à velocidade do ar (a transferência de calor e a taxa de evaporação aumentam com o aumento da velocidade do ar) e a depressão do bulbo úmido (a transferência de calor e a taxa de evaporação são proporcionais a depressão do bulbo úmido).

A quantidade de água a ser transportada para a superfície e evaporada é proporcional à densidade e a espessura da madeira, pois um material de alta densidade tem lúmens menores e, deste modo, pode ter um teor de umidade menor do que uma madeira de baixa densidade. Neste caso, a quantidade de umidade na madeira é definida em termos de sua densidade básica. O tempo de secagem é, assim, proporcional a quantidade de água a ser removida e inversamente proporcional a taxa de evaporação. Desta maneira, o tempo de secagem também é proporcional à densidade da madeira (a quantidade de água a ser removida é definida em termos de teor de umidade inicial), à espessura da peça (pela mesma razão), e à velocidade do ar.

Quando da secagem de madeiras altamente impermeáveis pode não haver fluxo de massa acima do PSF para manter evaporação. A difusão é lenta e o teor de umidade superficial cai rapidamente abaixo do PSF. Neste caso, a taxa de secagem é proporcional à densidade (mais material de parede celular é atravessado por unidade de distância, e isso oferece resistência a difusão), à espessura (em madeiras mais espessas, mais suave é o gradiente de secagem, pelo menos durante os últimos estágios de secagem) e à pressão de saturação de vapor, que está estreitamente relacionada com o coeficiente de difusão.

Mesmo com uma madeira permeável, a difusão assume importância a medida que o teor de umidade médio se aproxima do PSF. De fato, naquelas partes da madeira onde o teor de umidade se aproxima do PSF, a secagem é controlada por difusão. Madeiras permeáveis e impermeáveis, de densidades semelhantes, deveriam secar a partir do PSF a aproximadamente uma mesma taxa.

2.1.2. Propriedades térmicas da madeira

O calor é uma forma de energia transferida de um corpo para outro, devido a diferença de temperatura entre eles. A transferência pode ser por condução, convecção e radiação (SIMPSON, 1991):

Condução é uma forma de transferência de energia que ocorre de uma parte para outra em uma mesma substância, ou de uma substancia para outra que está em contato físico com ela, sem deslocamentos apreciáveis das moléculas que a formam. Neste caso, a energia é transferida de uma condição de alta para outra de baixa temperatura, dentro ou entre dois corpos.

Convecção é uma combinação complexa de condução de calor e fluxo de massa. É a forma mais importante de transferência de calor entre superfícies sólidas e líquidas ou gases. Convecção pode ser classificada em natural ou livre, que se refere ao deslocamento físico de energia pelo movimento de um líquido ou gás, induzido por diferenças de densidade; e convecção forçada, que corresponde ao deslocamento e mistura da energia induzida por ventiladores e bombas de ar. A convecção natural e a forçada podem ocorrer de forma independente ou em combinação.

Radiação é a transferência de energia através de espaços transparentes por meios eletromagnéticos, tais como comprimento de ondas infravermelho. Toda matéria emite continuamente radiação eletromagnética, a menos que sua temperatura seja zero absoluto. A quantidade de energia transferida é controlada em condução pela diferença de temperatura ($t_2 - t_1$); em convecção dentro de um meio pelas diferenças de densidade ou meios forçados, ou ambas; e em radiação pela diferença em temperatura absoluta na quarta potência ($T_2^4 - T_1^4$).

O conhecimento das propriedades térmicas não é importante apenas quando se considera as propriedades de resistência ao fogo e de isolamento térmico da madeira, mas também para estimar o tempo de aquecimento por ocasião do preparo das toras para laminação e o tempo de aquecimento na secagem em estufa (LANGRISH & WALKER, 1993). Especialmente no segundo caso, sua importância está relacionada com as necessidades de energia e com o tempo requerido para aquecer a madeira e o ambiente da estufa, até que a temperatura de secagem seja alcançada (SIMPSON, 1991). Entre as propriedades térmicas mais importantes, estão o calor específico, a condutividade térmica, a difusividade térmica e a expansão térmica.

2.1.2.1. Calor específico

O calor específico é definido como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma substância de massa conhecida, de uma grandeza para outra. Em outras palavras, é uma medida da energia requerida para elevar a temperatura do material. Matematicamente, o calor específico é expresso através da seguinte equação:

$$c = \frac{Q}{m.(T_2 - T_1)} \qquad \text{Equação 04}$$

onde:

c = calor específico, cal/g.°C

Q = quantidade de calor, cal

m = massa do material, g

T_1, T_2 = temperatura, °C

De acordo com STAMM (1964), o calor específico obtido de 20 espécies de madeiras diferentes, medido no intervalo de temperatura entre 0 a 106°C foi 0,327 ± 0,005 Kcal/kg.°C, praticamente independe da espécie, densidade e posição na árvore. Porém, a relação encontrada entre calor específico *c* e a temperatura média *t* acima de 0°C, é expressa por:

$$c = 0{,}266 + 0{,}00116t \qquad \text{Equação 05}$$

sendo que o valor 0,266 corresponde ao calor específico da madeira a 0°C. SKAAR (1972) cita uma série modelos obtidos para madeira seca, onde o valor oscila entre 0,259 e 0,280, dependendo da faixa de temperatura utilizada. Ele também constatou que o calor específico aumenta significativamente com a temperatura, semelhante a outros materiais orgânicos.

O valor da constante aumenta a medida que é incluída água no sistema, seja água de impregnação ou capilar. BROWN et al. (1952). O calor específico para madeira úmida é maior do que para madeira seca, porque este valor para a água é mais do que o triplo do que para madeira seca (SKAAR, 1972).

2.1.2.2. Condutividade térmica

A condutividade térmica *K* é a quantidade de energia *H*, que flui na unidade de tempo *t* através de uma substância de espessura *L* e área superficial *A*, sob uma diferença constante de temperatura ΔT entre suas faces (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968). O fluxo constante de calor é descrito pela lei de Fourier, que é semelhante a lei de Darcy para transporte de líquidos (SIAU, 1984). Matematicamente, ela pode ser apresentada como:

$$K = \frac{H / tA}{\Delta T / L} = \frac{HL}{tA\Delta T} \qquad \text{Equação 06}$$

ou como

$$H = \frac{KAt\Delta T}{L} \qquad \text{Equação 07}$$

onde,

K = condutividade térmica, cal/cm.°C.s

H = quantidade de calor transferido, cal

t = intervalo de tempo, s

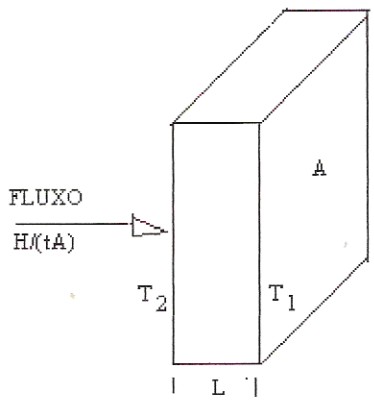
A = área da seção perpendicular à direção de fluxo, cm^2

L = comprimento do fluxo no meio de transferência, cm

ΔT = diferencial de temperatura entre as superfícies (T_2-T_1), °C

A Equação 06 evidencia que a condutividade térmica é numericamente igual a taxa de fluxo de calor (em cal/s) através de um cubo (com lado de 1 cm) entre duas superfícies paralelas opostas, que tem uma diferença de temperatura de 1°C (SIAU, 1971). O significado dos termos das Equações 06 e 07 encontra-se na Figura 2.

FIGURA 2 - SIGNIFICADO DOS TERMOS USADOS NA LEI DE FOURIER.



Fonte: SIAU (1984).

SIAU (1984) menciona que a condutividade térmica a 12% de umidade é de 3,0 e 7,5(10^{-4}) cal/cm.°C.s, respectivamente, para madeiras com massa específica de 0,45 e 0,70 g/cm^3. Em razão de sua baixa condutividade térmica, a madeira é considerada um material de boa capacidade isolante, principalmente no sentido perpendicular às fibras, onde a interrupção do fluxo de calor devido a presença de ar no lúmem celular, aumenta sua resistência ao fluxo. As propriedades isolantes da madeira tem várias vantagens e contribui substancialmente para melhorar suas propriedades de resistência ao fogo, quando comparada com metais altamente condutores, os quais tornam-se macios e enfraquecidos pela ação de altas temperaturas.

A condutividade térmica medida por MACLEAN (1941) citado por SIAU (1984), para diferentes valores de teor de umidade e massa específica, resultou na equação empírica apresentada abaixo:

$$K_{gt} = [G(5,18+0,096M)+0,57V_a].10^{-4} \quad \text{Equação 08}$$

onde,

K_{gt} = condutividade térmica transversal da madeira, cal/cm.°C.s

V_a = porosidade

G = massa específica básica da madeira, g/cm^3

M = teor de umidade inferior a 40%

Para teores de umidade superiores a 40%, uma significante porção da umidade encontra-se na forma de água livre nos lúmens, o que aparentemente contribui mais para a condutividade térmica total que a água de impregnação. Neste caso, o coeficiente multiplicador de M é alterado para:

$$K_{gt} = [G(5,18+0,131M)+0,57V_a].10^{-4} \quad \text{Equação 09}$$

onde,

M = teor de umidade superior a 40%

A relação entre a condutividade térmica longitudinal e transversal varia entre 2,25 e 2,75, com uma média de 2,5. Assim, assume-se que (SIAU, 1984):

$$K_{gl} = 2,5K_{gt} \quad \text{Equação 10}$$

onde,

K_{gl} = condutividade térmica longitudinal da madeira, cal/cm.°C.s

2.1.2.3. Difusividade térmica

A difusividade térmica determina a taxa de alteração da temperatura em um material, quando este é submetido a uma mudança na temperatura ambiente (WANGAARD, 1969). O

conhecimento da condução de calor na madeira é de interesse tanto para a secagem como para a preservação da madeira. A equação de Fourier para fluxo descontínuo de calor, pode ser escrita da seguinte maneira (SIAU, 1995):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_q \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad \text{Equação 11}$$

onde o coeficiente D_q, conhecido como difusividade térmica, é determinado pela relação abaixo:

$$D_q = \frac{K_q}{C_{pw} \cdot \rho} \qquad \text{Equação 12}$$

onde,

D_q = fator de difusividade térmica, m^2/h

K_q = condutividade térmica, kcal/m.h.°C

C_{pw} = calor específico da madeira, kcal/kg.°C

ρ = densidade da madeira, kg/m^3

$C_{pw}\rho$ = calor requerido para elevar em 1°C a temperatura de 1 m^3 de madeira, $kcal/m^3.°C$

Segundo KOLLMANN & CÔTÉ (1968) o fator de difusividade é influenciado pela densidade e teor de umidade da madeira, mas as mudanças são pequenas. O fator de difusividade decresce levemente com o aumento da densidade e do teor de umidade, porque o incremento da condutividade é compensada pelo aumento do calor específico e densidade verde. Este fator depende também da direção da grã, sendo que ao longo da madeira o aquecimento a partir dos extremos não se estende a distâncias importantes. A maioria das madeiras roliças precisam ser então aquecidas radialmente, enquanto que em material serrado o aquecimento pode ser a partir de ambas as direções, radial e tangencial, ou amplamente em uma dessas direções, dependendo das dimensões da seção transversal e da direção de corte segundo os anéis de crescimento. Valores tabelados para madeiras com densidade entre 0,20 e 0,80 g/cm^3 variaram entre 0,00068 e 0,00043 m^2/h, respectivamente.

2.1.2.4. Expansão térmica

Como o aumento na energia interna total de um certo volume de madeira é acompanhado por um aumento na vibração de suas moléculas, é lógico assumir que a distância média entre as moléculas torna-se maior a medida que a temperatura cresce. Esta situação persiste e resulta em expansão linear e volumétrica, quando uma energia externa é adicionada ao sistema.

A experiência tem demonstrado que quando um objeto é aquecido, a alteração em dimensão resultante é proporcional a dimensão inicial e aproximadamente proporcional a mudança em temperatura. O alongamento ΔL de uma vara com comprimento original L_1 , por uma alteração na temperatura ΔT, pode ser expresso pela equação (BROWN et al., 1952):

$$\Delta L = \alpha_t . L_1 . \Delta T \qquad \text{Equação 13}$$

onde,

$\Delta L = L_2 - L_1$

L_2 = comprimento final

L_1 = comprimento inicial

α_t = coeficiente de expansão térmica

$\Delta T = T_2 - T_1$

T_2 = temperatura final

T_1 = temperatura inicial

A partir da equação anterior, pode-se assumir que:

$$\alpha_t = \frac{1}{L_1} . \frac{\Delta L}{\Delta T} \qquad \text{Equação 14}$$

O coeficiente é expresso como fração de mudança em comprimento por graus Celsius de diferença em temperatura.

A madeira é constituída de aproximadamente 50% de celulose, cujas moléculas são em forma de cadeia, o que faz com que a amplitude de suas vibrações não seja a mesma em todas as direções. As longas cadeias de moléculas de celulose formam partes cristalinas semelhantes

a um bastão, com uma relação comprimento largura de aproximadamente 10. Em conseqüência, a amplitude das vibrações das moléculas precisa ser em torno de 10 vezes maior no sentido perpendicular à direção da cadeia que ao longo desta (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968). Da mesma forma que ocorre com o inchamento, a expansão térmica longitudinal é a mais baixa, seguida pela radial e pela tangencial. Devido a estrutura microscópica, a expansão térmica na direção tangencial é, em geral, pouco maior do que na radial. Além disso, tanto na expansão térmica como no inchamento, as variações nas direções radial e tangencial são dependentes da densidade, ao passo que a longitudinal parece não ser afetada por essa propriedade (SKAAR, 1972).). BROWN et al. (1952) citam para sugar maple (*Acer saccharum*), expansões térmicas transversal e longitudinal de $60{,}2 \times 10^{-6}$ e $4{,}22 \times 10^{-6}$, respectivamente.

2.1.3. Propriedades elétricas da madeira

Eletricidade pode ser conceituada como um fenômeno que revela as alterações nas propriedades elétricas em repouso (eletricidade estática) ou em movimento (eletricidade dinâmica). A eletricidade dinâmica (cargas elétricas em movimento) é sinônimo de corrente elétrica. Em geral, são reconhecidos dois tipos de corrente elétrica, a corrente contínua e a alternada, que no seu relacionamento com a madeira é conveniente analisá-las separadamente .

2.1.3.1. Corrente contínua

Corrente contínua é aquela que flui em apenas uma direção. A propriedade mais importante da madeira com respeito a corrente contínua, é sua resistência à passagem dessa corrente. A principal diferença entre essa resistência e a resistividade elétrica, termo freqüentemente citado na literatura, é que esta última leva em conta a área do eletrodo, ao passo que a primeira não considera este fator. Em termos matemáticos, a resistividade elétrica é expressa pela seguinte relação (BROWN et al., 1952):

$$r = \frac{RA}{d} \qquad \text{Equação 15}$$

onde,

r = resistividade, Ω.cm

R = resistência elétrica, Ω

A = área da seção transversal, cm^2

d = distância entre eletrodos, cm

Madeira bem seca é considerada um excelente isolante. Levando-se em conta que a madeira pode ser mantida numa condição bem seca ou seca em estufa, ela se aproxima dos materiais isolantes mais eficientes, como as resinas fenol-formaldeído. Infelizmente, a resistência elétrica da madeira diminui com o aumento do seu teor de umidade. Principalmente abaixo do PSF, a resistência elétrica sob corrente contínua da madeira diminui rapidamente a medida que o teor de umidade aumenta. Mesmo vestígios de água aumentam consideravelmente sua condutividade.

O mecanismo de condução elétrica depende da presença de íons na madeira. Um modelo para a condução iônica foi proposto por LIN (1965) para explicar a condução elétrica através da parede celular da madeira. Ele evidenciou que o número de condutores de cargas na madeira é o principal fator que afeta o mecanismo de condução, na faixa de umidade entre 0 e 20%. A teores de umidade mais altos, o grau de dissociação dos íons absorvidos é suficientemente alto, de modo que a mobilidade dos íons pode tornar-se o principal fator na determinação da condutividade elétrica. Por esta razão, qualquer alteração na concentração e distribuição de íon, ou em ambos, também mudará a condutividade elétrica da madeira.

A medição da condutividade elétrica de madeira e outros materiais celulósicos tem sido feita usando diferentes métodos. STAMM (1964) constatou a importância disso na determinação da condutividade elétrica de materiais celulósicos, para obter um bom contato elétrico. A faixa de voltagem em que as medições são feitas também afeta as leituras de resistência elétrica, as quais parecem ser razoavelmente constantes acima de um potencial de 30 volts.

STAMM (1929) citado por KOLLMANN & CÔTÉ (1968) correlacionou o logaritmo da resistividade elétrica em função do teor de umidade, e verificou que abaixo do PSF as curvas mostraram uma relação linear entre o logaritmo da condutividade elétrica (recíproco da resistividade) e o teor de umidade da madeira. A equação abaixo expressa esta relação:

$$\log k = \log \frac{1}{r} = a.u - C \qquad \text{Equação 16}$$

ou

$$r = 10^{C-a.u} = D.e^{-b.u} \qquad \text{Equação 17}$$

onde,

k = condutividade, $1/\Omega.cm$

r = resistividade, $\Omega.cm$

u = teor de umidade, %

a, b, C, D = constantes

Os modelos de equações não são tão úteis para os cálculos elétricos como são para a condutividade elétrica, porque existem vários fatores que afetam a resistência elétrica da madeira. A resistência elétrica da madeira diminui rapidamente com o aumento em temperatura e teor de umidade. Além disso, a presença de pequenas quantidades de impurezas orgânicas na parede celular pode diminuir significativamente sua resistência. Todos os fatores acima causam grandes variações na resistividade da substância parede celular, ao passo que sua condutividade térmica é essencialmente constante (SIAU, 1984).

A madeira apresenta menor resistência à passagem de corrente elétrica ao longo da grã que transversalmente a ela. A resistividade ao longo da grã é aproximadamente a metade da perpendicular a grã e na direção radial é igual ou até 10% menor que na direção tangencial. A espécie e massa específica tem um efeito secundário com respeito a resistência elétrica da madeira.

O aumento em temperatura causa uma diminuição na resistividade em madeira seca. Foi encontrada uma relação linear entre o logaritmo da resistividade na direção tangencial e o recíproco da temperatura absoluta. Da mesma forma, observou-se a existência de uma relação linear entre teor de umidade e temperatura. LIN (1965) constatou a influência da temperatura e teor de umidade sobre a resistividade elétrica da madeira, ao estabelecer uma relação entre o logaritmo desta e o recíproco da temperatura absoluta (1/T) para vários teores de umidade, encontrando curvas praticamente lineares para baixos teores de umidade e curvilíneas para valores mais altos.

O tratamento da madeira com preservativos hidrossolúveis ou com sais ignífugos, exerce uma influência significante sobre a condutividade elétrica. Os tratamentos com materiais

não higroscópicos de baixa condutividade, como resinas fenólicas, reduzem a condutividade elétrica da madeira, e este efeito é mais pronunciado se a umidade relativa do ar for alta (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

A resistividade elétrica da madeira é uma propriedade física variável útil para medir o seu teor de umidade. Geralmente os medidores de umidade de madeira baseados nesta propriedade, são mais eficientes entre aproximadamente 6% e 20% de umidade, sendo que a precisão é relativamente baixa acima do ponto de saturação das fibras (SIAU, 1984).

2.1.3.2. Corrente alternada

Ao contrário da corrente contínua, que é unidirecional, a corrente alternada inverte sua direção de fluxo regularmente, em intervalos periódicos. Quando o período de oscilação é longo, ou seja, a frequência é muito baixa, o fenômeno corrente alternada é estritamente paralelo ao da corrente contínua. A medida que a frequência das oscilações aumenta, principalmente na faixa de freqüências de rádio, as propriedades da corrente alternada tornam-se surpreendentemente diferente daquelas associadas com corrente contínua (BROWN et al., 1952).

a) Resistividade radiofrequência

A resistividade elétrica da madeira sob alta frequência é muito baixa em comparação com a resistividade sob corrente contínua. Para madeira seca em estufa, a resistividade transversal sob alta frequência é $18x10^6$ Ω.cm a 2 megaciclos/s, o que eqüivale a menos que um bilionésimo da resistividade sob corrente contínua.

O efeito do teor de umidade sobre a resistividade alta frequência é muito pequeno, comparado com o da corrente contínua. No intervalo de 0 até 30% de umidade, o primeiro decresce para um valor em torno de 10^{-13} e o último apenas para aproximadamente 10^{-1}.

Entre resistividade e frequência existe uma correlação direta. Entretanto, como o fator de potência e a constante dielétrica oscilam apenas levemente com a frequência, resulta que a resistividade de um meio, que inclui a madeira, é aproximadamente inversamente proporcional a frequência (BROWN et al., 1952).

b) Constante dielétrica

Se uma peça de madeira, tida como um mau condutor elétrico, é colocada entre duas placas paralelas (eletrodos) em um circuito de corrente alternada, o sistema eletrodos-madeira é equivalente a um condensador com capacitância *C*, em paralelo com a resistência *R*. A corrente *I* no sistema consiste de dois componentes: *Ic* devido ao condensador (capacitância) e *Ir* por causa da resistência (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

Sob a influência da voltagem alternada, as moléculas na madeira são submetidas a movimentos cíclicos que causam fricção dentro das moléculas individuais e entre moléculas diferentes. A fricção produz calor, o qual é dissipado. A magnitude da potência *P* no circuito é:

$$P = E.Ir = E.I\cos\varphi = \frac{E^2}{R} \qquad \text{Equação 18}$$

onde,

P = potência,

E = voltagem efetiva, volt/cm

Ir = corrente do condensador

I = corrente elétrica

φ = ângulo de perda de potência

R = resistência elétrica, ohm

$\cos\varphi$ = fator de potência (expressa a relação entre a potência dissipada e a potência total induzida no circuito).

A reatância *Xc* do condensador pode ser expressa em termos de sua capacitância *C* e frequência angular ω ou frequência *f* em ciclos por segundo, respectivamente.

$$Xc = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \qquad \text{Equação 19}$$

A capacitância *C* de um condensador pode ser calculada da seguinte maneira:

$$C = \frac{\varepsilon A}{36\pi d}.10^{-11} \qquad \text{Equação 20}$$

onde,

C = capacitância, farad

ε = constante dielétrica

A = área, cm^2

d = espessura, cm

A condutividade específica corrente alternada *k* é definida através do modelo:

$$k = \frac{1}{R}.\frac{d}{A} = \frac{f.\varepsilon.tg\delta}{1{,}8x10^{12}} \qquad \text{Equação 21}$$

onde,

k = condutividade específica corrente alternada, $1/\Omega.cm$

$tg(90° - \varphi) = sen(90° - \varphi) = tg\delta = cos\varphi$

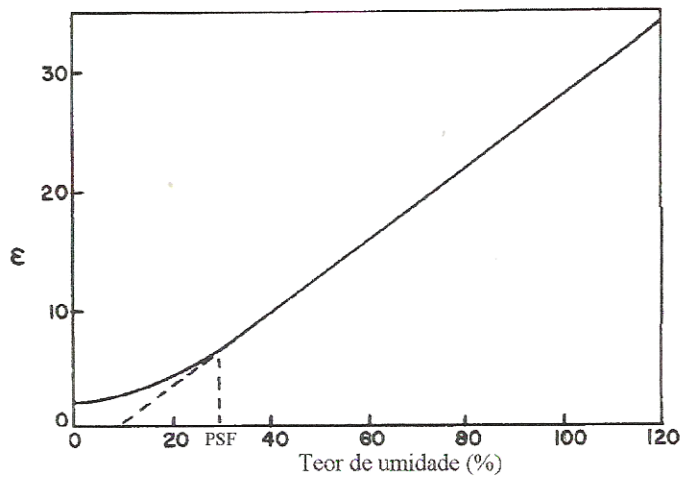
O comportamento dielétrico da madeira é caracterizado por sua constante dielétrica ε, a condutividade específica *k*, e o fator perda de potência $tg\delta$. Cada uma dessas unidades podem ser calculadas a partir de outras duas por meio da Equação 21. A condutividade específica é particularmente importante uma vez que determina as perdas de potência e, desta maneira, o aumento da temperatura na madeira.

A constante dielétrica da madeira é afetada pelo teor de umidade, temperatura, frequência e direção da grã. Em conseqüência disso, o uso de um modelo de equação é submetido a limitações similares àquelas que se aplica para a equação de resistividade elétrica. A mudança em constante dielétrica com o teor de umidade, é a base do medidor de umidade tipo capacitância ou dielétrico (SIAU, 1971).

A uma determinada frequência, por exemplo na faixa de 1 a 10 megahertz (10^6 Hertz), a constante dielétrica é notadamente afetada tanto pelo teor de umidade como pela densidade da madeira. A constante dielétrica de uma parede celular seca nessas freqüências é na ordem de 4 ao passo que da água líquida esta em torno de 80. Por esta razão, a medida que o teor de umidade da madeira aumenta a sua constante dielétrica também aumenta. Este aumento é não-linear no limite higroscópico, mas aparentemente linear acima do PSF (Figura 3). Acredita-se

que a razão da não linearidade no limite higroscópico está associada com a liberdade limitada de rotação da água adsorvida a esses teores de umidade. A medida que o teor de umidade aumenta, as moléculas de água adicionadas tem maior liberdade de rotação e, como conseqüência, dão uma maior contribuição por molécula para a constante dielétrica que aquelas adicionadas a teores de umidade menores. Acima do PSF a água adicionada tem essencialmente a mesma constante dielétrica efetiva como a água líquida, e a curva tende a tornar-se linear, como mostra a Figura 3 (SKAAR, 1972).

FIGURA 3 - RELAÇÃO ENTRE CONSTANTE DIELÉTRICA ε E O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA A UMA FREQUÊNCIA DE 2 MHz.



Fonte: SKAAR (1972).

Como a madeira consiste tanto de material de parede celular como de espaço vazio (onde a constante dielétrica é essencialmente unitária), é esperado que a constante dielétrica da madeira aumente com a densidade a um determinado teor de umidade. O aumento da temperatura tem um efeito sobre a constante dielétrica similar ao aumento no teor de umidade a uma determinada frequência.

As constantes dielétricas de madeiras comerciais, na faixa média de densidade e condição seca em estufa, variam entre aproximadamente entre 1,8 e 3,0 para madeira orientada tangencialmente, em que a direção do campo é radial aos anéis de crescimento. Quando o campo é direcionado ao longo da grã, os valores de ε tornam-se 30 a 60% maiores do que quando é perpendicular a grã. A constante dielétrica é diretamente proporcional à densidade, e

decresce com a diminuição do teor de umidade. KRÖNER (1944), citado por KOLLMANN & CÔTÉ (1968), encontrou para teores de umidade menores que 12% e freqüências na faixa de 10^6 e 10^9 ciclos por segundo, uma relação aproximadamente linear entre constante dielétrica e teor de umidade, e admitiu a combinação logaritma abaixo:

$$\log \varepsilon = (1 - x)\log \varepsilon_w + x \log \varepsilon_{H2O} = \frac{1}{1+u} \log \varepsilon_w + \frac{u}{1+u} \log \varepsilon_{H2O} \qquad \text{Equação 22}$$

onde,

ε = constante dielétrica da mistura água/madeira

ε_w = constante dielétrica da madeira seca

ε_{H2O} = constante dielétrica da água (81,0)

x = teor de umidade base úmida

u = teor de umidade base seca.

c) Fator de potência

O fator de potência de um material dielétrico como a madeira, é a relação da energia elétrica dissipada por ciclo de oscilação num condensador, usando o material como o dielétrico, com a energia elétrica total armazenada no condensador durante o ciclo (BROWN et al., 1952). Portanto, é uma medida da fração da energia perdida durante cada ciclo devido a fricção. O fator de potência depende também da frequência do campo elétrico (SKAAR, 1972). Caso seja empregado um vácuo no condensador, as moléculas não ficam disponíveis, o que sob a influência da voltagem alternada, poderia provocar fricção molecular dissipada na forma de calor. Em conseqüência disso, neste caso especial, o fator de potência é zero. Em outras palavras, o fator de potência não pode exceder um valor unitário para o ângulo $\pi/2$ radianos.

Um condensador dielétrico para madeira pode ser representado eletricamente por um circuito que consiste de uma combinação paralela de uma capacitância *C* e uma resistência *R*. A voltagem alternada *E* causa um fluxo de corrente total *I* no sistema. Esta corrente efetiva total *I* consiste de dois componentes, denominados de componente *Ic* que flui através da capacitância *C*, e *Ir* que circula através da resistência *R*.

Existe uma relação entre esses componentes da corrente. A corrente total *I* induz a voltagem *E* pelo ângulo de fase φ. A componente da corrente de resistência *Ir* está na fase com a voltagem, enquanto que a componente de reatância *Ic* induz a voltagem por uma fase de ângulo de π/2 radianos (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

A potência aparente *Pt* existente no circuito é determinada pelo produto da voltagem *E* e a corrente total *I*:

$$Pt = E.I \qquad \text{Equação 23}$$

Uma parte da potência aparente é dissipada como calor. A magnitude dessa perda de potência *P* é diretamente proporcional a quantidade de corrente *Ir* que flui através da resistência *R*, como mostra a Equação 18, a qual pode ser rescrita da seguinte maneira:

$$P = E.I.\cos\varphi \quad \text{ou} \quad \cos\varphi = \frac{P}{E.I} = \frac{P}{Pt} \qquad \text{Equação 24}$$

Portanto, na Equação 24 a função trigonométrica *cosφ* representa o fator de potência como a relação entre a energia dissipada *P* e a potência total *Pt* existente no circuito. O fator de potência pode ser expresso usando a corrente *Ir* através da resistência e a corrente efetiva total *I*:

$$\cos\varphi = \frac{Ir}{I} \qquad \text{Equação 25}$$

e como

$$I = \sqrt{Ir^2 + Ic^2} \qquad \text{Equação 26}$$

$$\cos\varphi = \frac{Ir}{\sqrt{Ic^2 + Ir^2}} \qquad \text{Equação 27}$$

A partir da Equação 15 pode-se obter a resistência elétrica *R* através da seguinte relação:

$$R = \frac{r.d}{A} \qquad \text{Equação 28}$$

onde,

d = comprimento do resistor, cm

A = área da seção transversal do resistor, cm^2

Considerando que para pequenos ângulos $tg\delta = cos\varphi$, e usando as Equações 21 e 28, tem-se:

$$tg\delta = \cos\varphi = \frac{1{,}8x10^{12}}{r.f.\varepsilon} \qquad \text{Equação 29}$$

Com base na Equação 29, verifica-se que para uma frequência constante, a resistividade r varia inversamente com o produto do fator de potência $cos\varphi$ e a constante dielétrica ε. O fator de potência da madeira depende de sua densidade apenas com uma fraca correlação positiva, sem restrição do tipo e natureza química. O fator de potência paralelo à grã para uma peça de madeira (da condição seca até em torno de 7% de teor de umidade) corresponde a aproximadamente duas vezes o valor perpendicular à grã.

A relação existente entre o fator de potência e o teor de umidade da madeira, propiciou o desenvolvimento de um tipo comum de medidor de umidade, conhecido como medidor de perda de potência, que mede os efeitos combinados de variação, tanto em constante dielétrica como em fator de potência, com o teor de umidade (SKAAR, 1972).

2.2. PROCESSOS DE SECAGEM DE MADEIRA SERRADA E EQUIPAMENTOS BÁSICOS

A secagem de madeiras, tanto na forma serrada como de lâmina, pode ser realizada através de diferentes métodos, variando desde o mais simples como ao ar livre até os mais sofisticados como o uso de secadores de alta frequência e infravermelho. A escolha de um ou outro método depende basicamente do tipo de material a ser seco, no que se refere a espécie,

dimensões e seu uso final, da infra-estrutura disponível, principalmente quanto a equipamentos e tecnologias existentes no mercado, e dos custos de secagem.

Como o objetivo principal deste estudo é o controle do processo, foram considerados apenas os métodos que empregam câmaras ou estufas no processamento de secagem da madeira. A secagem controlada de madeira serrada, além de diminuir o tempo e minimizar ou eliminar os defeitos de secagem, permite a obtenção de teores de umidade preestabelecidos e suficientemente baixos.

Dentre os processos comumente utilizados na secagem de madeira serrada, destacam-se os seguintes:

2.2.1. Secagem a baixa temperatura

A secagem a baixa temperatura abrange os processos que utilizam temperaturas inferiores a 50°C (ARGANBRIGHT, 1979). Embora esta denominação seja empregada com frequência para identificar diferentes técnicas, ela está associada principalmente aos desumidificadores, disponíveis comercialmente na Europa, América do Norte e do Sul, aos pré-secadores de grande capacidade, e às estufas solares.

A secagem por desumidificação é operada geralmente entre 30 e 40°C e constitui-se de uma câmara, um sistema de aquecimento, um sistema de circulação de ar e um desumidificador (CECH & PFAFF, 1977). Este último é o equipamento mais importante no processo, pois tem a função de retirar a umidade do ar circulante na câmara. Para que isso aconteça, o ar saturado passa num sistema de serpentinas refrigeradas, onde é resfriado. Este resfriamento provoca a condensação da umidade do ar nas serpentinas e a água flui para uma bandeja colocada na base do equipamento, de onde é drenada para o exterior. O ar seco é a seguir aquecido e impulsionado pelos ventiladores para o interior da câmara. Ao atravessar as pilhas de madeira, o ar adquire umidade e retorna ao sistema de desumidificação, onde sofre reciclagem para manter as condições da câmara.

A operação do processo é controlada por um termostato e umidostato, que proporcionam algum controle sobre as condições de secagem. A temperatura é a única variável com controle perfeito neste processo. A umidade adicionada ao ambiente é apenas aquela resultante da evaporação da água da madeira, ao contrário das estufas convencionais que possibilitam aumentar ou diminuir a umidade relativa do ar.

É um método recomendado para secar madeiras refratárias e material espesso, devido a baixa degradação resultante. O controle das condições internas e o menor tempo em secagem são vantagens dos desumidificadores em comparação com a secagem ao ar livre, entretanto, o elevado consumo de energia confere limitações ao emprego deste método.

Uma outra alternativa de secagem a baixa temperatura é a estufa solar, que consiste basicamente de uma estrutura de madeira e uma cobertura translúcida ou transparente, a qual permite a passagem da energia solar incidente para o seu interior e minimiza as perdas de calor por irradiação (WENGERT, 1971). As superfícies internas da câmara, pintadas de preto, absorvem a energia solar de ondas curtas, e transforma-a em calor, o qual é transferido para o ar principalmente por convecção (SHARMA, 1975). A estufa solar necessita, basicamente, de um sistema de coleta da energia para o aquecimento do ar e da distribuição do ar aquecido (BANKS, 1969).

A secagem em estufa solar também é considerada um processo intermediário entre a secagem ao ar livre, em que os fatores envolvidos no processo não são totalmente controlados, e a secagem em estufa convencional, onde o aquecimento é artificial e os fatores de secagem podem ser perfeitamente controlados (VITAL & COLLOM, 1974).

De acordo com SIMPSON (1991), a energia solar de baixa intensidade geralmente limita a temperatura de operação da estufa a aproximadamente 55°C, a menos que coletores solares especiais de custo relativamente alto sejam utilizados. Entretanto, em estudos conduzidos no Brasil foi observada uma temperatura de 62°C nos estágios finais da secagem, quando a diferença máxima entre as temperaturas interna e externa foi de 44°C (SANTINI, 1983).

De acordo com PLUMPTRE (1985), as estufas solares podem ser classificadas como tipo casa de vegetação, onde todas as paredes e teto são de coberturas transparentes e os coletores de energia estão localizados internamente; como tipo casa de vegetação parcial, onde o teto e algumas paredes são envidraçadas e o assoalho isolado para reduzir perdas de calor; como estufas com coletores externos, separados da câmara de secagem e interligados por tubulações isoladas; e como uma combinação estufa solar/desumidificador. Em estudos conduzidos por CHEN et al. (1982), este último tipo apresentou menor tempo e menos degradação de secagem, e os custos de energia foram apenas 82% daqueles da secagem solar.

As principais características da secagem solar são a boa qualidade do material seco particularmente de madeiras de folhosas refratárias, a capacidade de obtenção de teores de

umidade menores do que a umidade de equilíbrio requerida para o uso final, baixo custo de capital, baixo consumo de energia e custo operacional, de fácil operação e controle para obter adequada qualidade de secagem, e a construção simples pode ser realizada por pessoal não especializado (PLUMPTRE, 1985).

Apesar de ser um método relativamente simples e dependente das condições atmosféricas, algumas pesquisas consideram a possibilidade de dotar o equipamento de secagem de avançados sistemas de controle. STEINMANN et al. (1980) revisaram os sistemas existentes e as medidas de controle, e descreveram uma estufa solar automatizada. Posteriormente, discutiram o controle lógico da estufa solar com o uso de um microprocessador, comparando-a com a secagem ao ar (STEINMANN et al., 1981). KAVVOURAS & SKARVELIS (1993) descrevem com detalhe o hardware, o software e o controle lógico usado no sistema de controle computadorizado que monitora continuamente o teor de umidade da madeira e a umidade de equilíbrio de um secador solar experimental, e comparam-no com um sistema de controle semi-automático utilizado no mesmo equipamento.

Até o momento, a secagem solar tem sido utilizada nos Estados Unidos por empresas de pequeno porte que processam pequenas quantidades de madeira e de boa qualidade, e não dispõem de fornecimento contínuo de matéria-prima. Este fato também ocorre com as poucas estufas deste tipo que operam comercialmente na Europa. Este processo dificilmente será adotado pelas grandes empresas das altas latitudes, a menos que no inverno seja auxiliado por desumidificadores ou outro meio de suplementação de energia. É provável, contudo, que estufas solares simples e pequenas possibilitem que pequenos usuários de madeira como fabricantes de pequenos objetos de madeira, marcenarias, pequenos produtores de móveis e pequenas serrarias obtenham madeira adequadamente seca a preços muito menores do que aqueles obtidos pelos grandes comerciantes (PLUMPTRE, 1985).

Os pré-secadores são equipamentos de grandes dimensões, usados para secar grandes volumes de madeira, desde verde até aproximadamente 25%, antes da secagem em estufa até um teor de umidade final mais baixo. Eles são construídos com capacidade desde 100 até mais de 2000 m^3, e são tipicamente dimensionados com capacidade quatro vezes maior que a da estufa (SIMPSON, 1991). A maioria deles são feitos em estruturas de aço, com isolamento de espuma rígida de 25 a 50 mm entre a cobertura de alumínio ou aço pintado, e possuem piso de concreto. A temperatura e a umidade relativa do ar são controladas com pontos de ajuste, o de temperatura tipicamente variando de 25 a 40°C e a umidade relativa mantida entre 60 e 90%.

Pré-secadores que controlam as condições de secagem ao ar tem sido usados com êxito a mais de 25 anos por algumas companhias das latitudes norte dos Estados Unidos, onde as condições de secagem ao ar livre são desfavoráveis durante muitos meses, tanto do ponto de vista de desenvolvimento de defeitos como do tempo de secagem. Contudo, nos últimos anos os altos preços da madeira e as altas taxas de juros produziram incentivos financeiros fortes o suficiente para atrair produtores de madeira em outras áreas, especialmente produtores de folhosas que secaram ao ar sua madeira durante 60 a 90 dias ou mais antes da secagem final em estufa.

As vantagens da pré-secagem sobre a secagem ao ar livre no pátio são produção de madeira mais clara, com teor de umidade mais uniforme e redução dos defeitos de secagem, todos aproximadamente três vezes menores. Consequentemente, o estoque pode ser reduzido de 1/3 a ½, liberando o capital e o espaço no pátio.

Freqüentemente são misturados no pré-secador madeiras de várias espécies, com diferentes espessuras e teores de umidade. Madeiras mais secas normalmente são transferidas para as estufas, da mesma forma que madeira verde recém adquirida pode ser introduzida no secador. A madeira é usualmente empilhada de forma similar, em grupos, por espécie, espessuras e níveis de teor de umidade. As desvantagens dos pré-secadores em relação a secagem ao ar livre, estão amplamente associadas com os custos de construção, energia e manutenção.

Os pré-secadores são tipicamente aquecidos com vapor e trocadores de calor. A umidade relativa interna é controlada através de aberturas externas quando está muito alta, e pelo uso da umidade evaporada da madeira para manter a umidade tão alta quanto necessária. Devido às suas dimensões, os pré-secadores são divididos em duas ou três zonas, sendo que em cada uma delas as condições são controladas separadamente por meio de controladores-registradores. A temperatura usualmente é observada por meio de detectores de temperatura eletrônicos por resistência (RTD) e a umidade relativa por termômetro de bulbo úmido, através de sensores de umidade relativa que usam almofada de celulose (tecido de algodão).

A circulação do ar é usualmente realizada por ventiladores situados superiormente, arranjados em filas horizontais entre duas fileiras de pilhas de madeira. O ar é direcionado de cima para baixo entre as fileiras de pilhas, através de deflectômetros ou transmitido diretamente pelos ventiladores, e então passa através da pilha de madeira. Um aspecto desfavorável dos pré-secadores tem sido a distribuição desuniforme de ar que resulta numa secagem desigual do topo

para a base das pilhas. Várias formas de sistemas defletores tem sido sugerido para melhorar a distribuição e uniformidade do fluxo de ar.

O uso de pré-secadores em detrimento da secagem ao ar livre, tem ganho grande aceitação na indústria de madeira de folhosas, embora não seja uma técnica adequada e vantajosa para todas as operações e instalações.

2.2.2. Secagem convencional

É um método de secagem completamente controlado, que opera a temperaturas inferiores a 100°C. A literatura menciona que perdas de calor e deficiências na sua transferência, geralmente limitam a temperatura máxima a valores entre 80 e 90°C (CECH & PFAFF, 1977). Câmaras de alvenaria ou de metal pré-fabricadas, com capacidade de secagem entre 20 e 40 m^3 de madeira serrada, são as mais freqüentemente encontradas nas condições brasileiras (TOMASELLI, 1974). A principal distinção entre as estufas convencional e de baixa temperatura, contudo, está na temperatura de operação, grau de instrumentação e método de construção, embora os dois métodos sejam semelhantes (KININMONTH, 1975).

O funcionamento da estufa basicamente ocorre da seguinte maneira: ventiladores reversíveis impulsionam o ar, que depois de passar por radiadores ou serpentinas de aquecimento atinge a pilha transversalmente, transferindo a umidade da superfície da madeira para o ambiente. O número de ventiladores deve possibilitar a distribuição uniforme do ar à velocidade entre 2 e 3 m/s. Embora o vapor produzido por caldeiras seja a fonte de calor mais comum nas estufas convencionais, sistemas de aquecimento elétricos também são utilizados.

A umidade relativa é controlada por um sistema de produção de vapor ou por válvulas vaporizadoras de água, e por um sistema de renovação do ar. A manutenção das condições desejadas, fornecidas por estes mecanismos é comandada por programas de secagem previamente elaborados e regulados por meio de controladores automáticos, semi-automáticos e manuais.

As pilhas de madeira normalmente são confeccionadas sobre carrinhos, fora da estufa, os quais são tracionados para o interior da estufa deslocando-se sobre trilhos. Amostras de secagem previamente distribuídas na pilha ou medidores contínuos tipo resistência elétrica, podem ser usados para controlar o teor de umidade da carga de madeira.

A principal vantagem da secagem convencional sobre os processos anteriores é a redução no tempo de secagem. Além disso, a existência de um sistema de produção de vapor controlado possibilita a realização da uniformização, que reduz a variação no teor de umidade final entre as peças, e o condicionamento que elimina tensões internas no final da secagem. Estes procedimentos são necessários, respectivamente, quando o teor de umidade inicial da carga é desigual ou a secagem é desuniforme, e quando a madeira será resserada. Uma das limitações do método é a necessidade de pessoal especializado, para efetuar as manutenções periódicas do equipamento e aplicar o programa de secagem estabelecido.

2.2.3. Secagem a alta temperatura

Esta denominação é utilizada para identificar um processo que emprega temperaturas superiores ao ponto de ebulição da água (LOWERY et al., 1968), usualmente entre 115 e 125°C (KININMONTH, 1975).

Inicialmente, dois tipos foram desenvolvidos: vapor superaquecido e mistura ar/vapor. No primeiro, a temperatura do bulbo úmido é mantida a 100°C e a presença do ar é excluída, sendo sua circulação realizada por jatos de vapor. No segundo, são mantidas temperaturas de 100°C ou mais, e inferiores ao ponto de ebulição da água, respectivamente, nos termômetros de bulbo seco e bulbo úmido (VERMAAS, 1987). Atualmente, a secagem a alta temperatura é conduzida quase que exclusivamente com a mistura ar/vapor, por causar menor depreciação da madeira e menor deterioração do equipamento.

A literatura menciona que a primeira patente com o título "aparato para secagem de madeira por vapor superaquecido", foi concedida a C.F. Allen e Luther W. Campbell, em 1867. Posteriormente, o uso de vapor superaquecido foi proposto na Rússia, em 1875; em 1897, por Möller e Pfeiffer na Alemanha; e por Tiemann em 1918 nos Estados Unidos.

Deterioração do equipamento, altos custos de manutenção e baixa qualidade da madeira foram os principais problemas encontrados inicialmente. Entre 1939 e 1944, Fischer e Czepek realizaram vários experimentos usando pequenas estufas aquecidas eletricamente e equipadas com ventiladores. Eles encontraram tempos de secagem extraordinariamente curtos para coníferas, e após a II Guerra Mundial esses estudos serviram de base para outros cientistas alemães trabalharem na secagem a ar quente e no desenvolvimento de equipamentos comerciais (LOWERY et al., 1968).

Apesar do método não ser recente, somente nos últimos 20 anos foram alcançados os maiores progressos por pesquisadores americanos, canadenses, alemães, australianos, indianos, dentre outros. O emprego do processo em escala comercial começou em 1966, nos Estados Unidos, sendo atualmente utilizado principalmente para madeiras de coníferas (McMILLEN & WENGERT, 1978). Embora a tecnologia de secagem a alta temperatura não tenha avançado o suficiente para ser aplicada às nossas madeiras de folhosas, estudos realizados no Canadá, Estados Unidos e Europa indicam que o método é tecnicamente viável para algumas espécies de madeiras duras previamente secas ao ar livre (LOWERY et al., 1968). Madeiras de folhosas de pequena espessura, bastante permeáveis, não propensas a defeitos graves, talvez possam ser processadas desde o estado verde (McMILLEN & WENGERT, 1978). Todavia, nessas situações em geral, é necessário realizar no final da secagem os tratamentos de uniformização e de condicionamento da madeira.

A velocidade de circulação do ar é um fator importante na secagem a alta temperatura. Um aumento no seu valor implica num aumento da taxa de transferência de calor para a superfície, bem como uma maior rapidez na remoção da água da madeira.

O equilíbrio entre a velocidade do ar e a temperatura de secagem também é importante neste processo. A medida que se aumenta a temperatura, maiores velocidades de ar devem ser utilizadas para que a energia seja melhor aproveitada, racionalizando os custos de secagem. Valores entre 3 e 10 m/s, dependendo da temperatura de secagem, podem ser utilizados (TOMASELLI, 1977).

As principais alterações da secagem a alta temperatura em relação às estufas convencionais, são: aumento na velocidade do ar, melhoria nas condições de ventilação, no empilhamento e no sistema de isolamento e proteção do equipamento (TOMASELLI, 1976). Essas diferenças resultam em redução no tempo devido ao aumento na taxa de secagem. Este fato, além de tornar o processo produtivo mais flexível, reduz significativamente o espaço necessário para estocagem de madeira.

A diminuição no tempo de secagem provoca uma redução de 25 a 50% no consumo de energia, que aliado a outros fatores como juros, retorno de investimento e taxas, resulta na diminuição dos custos de secagem (McMILLEN & WENGERT, 1978). Outra vantagem importante é a diminuição da umidade de equilíbrio da madeira, resultando num aumento extremamente desejável na sua estabilidade dimensional (TOMASELLI, 1977).

Uma das limitações da secagem a alta temperatura esta relacionada com a dificuldade de aplicação para madeiras de folhosas, particularmente as refratárias. Além disso, devido a maior demanda de energia, de melhor isolamento térmico, de maior eficiência na transferência de calor, e de mais insumos para a sua construção, o investimento inicial para as estufas a alta temperatura é apreciavelmente maior do que para as estufas convencionais.

2.2.4. Secagem a vácuo

A secagem a vácuo vem sendo estudada desde o início do século, mas não foi empregada até a década de 70 por ser considerada antieconômica. A principal atração da secagem a vácuo é que a reduzida temperatura de ebulição da água sob vácuo parcial, permite que a água capilar seja vaporizada e removida da madeira a temperaturas inferiores a 100°C, quase tão rapidamente quanto à temperaturas superiores a 100°C na pressão atmosférica. A taxa de secagem é, deste modo, aumentada sem o perigo de ocorrência de defeitos que certamente se desenvolveriam em algumas espécies durante a secagem a alta temperatura (SIMPSON, 1991).

As estufas a vácuo constituem-se de cilindros de pressão ou autoclave, com capacidade média para 15 m^3 de madeira, confeccionados de aço especial e isolados externamente com fibra de vidro envolvida em lâminas de alumínio. A madeira é empilhada sobre carrinhos que são deslocados sobre trilhos até o interior da autoclave (MASPELL, 1980). O ar impulsionado por ventiladores dispostos superiormente, é aquecido através de serpentinas e depois conduzidos através da pilha de madeira, provocando a evaporação da umidade. Todas as partes não aquecidas, que entram em contato com o vapor, são feitas de material resistente à corrosão (NEW, 1986).

A secagem a vácuo é, essencialmente, uma secagem a alta temperatura conduzida a temperaturas baixas. Durante o início dos anos 70, a perspectiva econômica para a secagem a vácuo tornou-se mais favorável, principalmente devido ao aumento nos custos resultantes de grandes estoques de madeira durante longos períodos de secagem. Isto é particularmente verdadeiro na secagem de madeiras espessas, refratárias, de alto valor, que podem ser secas com segurança em uma estufa a vácuo num tempo menor que a secagem convencional. A literatura compara que em relação aos sistemas convencionais, na estufa a vácuo a madeira seca 5 a 10 vezes mais rápido e com um consumo de energia 50 a 80% menor (NEW, 1986).

Para reduzir os ajustes manuais durante o período de secagem, foi desenvolvido um microprocessador que controla automaticamente o processo de secagem (MASPELL, 1980). Alguns sistemas são computadorizados, o que facilita controle e a automação do processo.

Alguns sistemas utilizam ciclos repetitivos, cada um consistindo de duas fases: uma de aquecimento e uma de vácuo (MASPELL, 1980). Em outros, a madeira é seca a baixa pressão numa atmosfera de vapor superaquecido (NEW, 1986).

A principal diferença entre os vários tipos de estufas a vácuo existentes no mercado é o modo como o calor é transferido para a madeira. A transferência de calor por convecção num vácuo parcial é quase inexistente.

Em um tipo comum de estufa a vácuo, existem ciclos alternados de vácuo e pressão atmosférica. O calor é aplicado convectivamente na madeira a pressão atmosférica, e então um ciclo de vácuo é aplicado para remover a água a baixa temperatura. Esses ciclos são alternados durante a secagem. Outro tipo comum de estufa a vácuo mantém um vácuo durante todo o processo de secagem, e o calor é transferido para a madeira por contato direto com pratos aquecidos a vapor ou por mantas condutivas aquecidas eletricamente que entram em contato com a madeira. Um terceiro tipo emprega energia elétrica a alta-frequência para aquecer a madeira. Em todos os tipos, a água é removida da câmara de secagem através de bombas.

2.3. VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NO CONTROLE DO PROCESSOS DE SECAGEM

As condições internas ideais de uma câmara de secagem, que propiciam uma taxa de secagem máxima com uma depreciação mínima da madeira, são obtidas através de ajustes da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar (VERMAAS, 1985). Uma quarta variável, que afeta diretamente as anteriores quando da elaboração dos programas de secagem, é a umidade da madeira.

2.3.1. Temperatura e umidade relativa do ar

De acordo com HILDEBRAND (1970), as temperaturas fornecidas pelos termômetros de bulbos seco e úmido são as duas variáveis mensuráveis necessárias para controlar o processo de secagem em estufa. Os valores obtidos no termômetro de bulbo seco, que indicam a

temperatura do ar, e no termômetro de bulbo úmido, permitem calcular a umidade relativa do ambiente (VERMAAS, 1979; VERMAAS, 1985; HILDEBRAND, 1970).

Os relatos de SIMPSON (1991) tentam esclarecer essas interrelações. Quando ar insaturado é induzido ao contato com a água, ele se umedece e resfria-se. Se o sistema funciona de maneira a não ganhar ou perder energia para o ambiente circundante, o processo é adiabático. Deste modo, se a água permanece a temperatura constante, o calor latente de evaporação precisa equiparar-se ao calor sensível aliviado pelo ar, por ocasião do resfriamento. Se a temperatura alcançada pelo ar quando ele se torna saturado é a mesma da água, esta é denominada de temperatura de saturação adiabática ou temperatura termodinâmica de bulbo úmido.

Quando o ar insaturado passa sobre um bulbo umedecido de termômetro, de maneira que evapora água da superfície umedecida e leva o bulbo do termômetro a resfriar-se, é atingida uma temperatura de equilíbrio conhecida como temperatura de bulbo úmido verdadeira. Neste ponto, a taxa de transferência de calor da superfície umedecida é igual à taxa que ela perde energia na forma de calor latente de evaporação. As temperaturas de bulbo úmido termodinâmica e de bulbo úmido verdadeira não são necessariamente iguais, mas na faixa de 100 a 150°C a diferença entre elas é desprezível. Deste modo, os valores de umidade relativa, baseados na diferença entre a temperatura de bulbo seco e a temperatura de bulbo úmido termodinâmica, não diferem significativamente daqueles baseados na diferença entre a temperatura de bulbo seco e a temperatura de bulbo úmido verdadeiro.

A umidade relativa pode ser calculada a partir da temperatura de saturação adiabática através do seguinte procedimento. Escrevendo o equilíbrio de energia e massa para o processo de saturação adiabática, de acordo com SIMPSON & ROSEN (1981), tem-se:

$$Y = Y_S - \frac{(0{,}24 + 0{,}44Y_S)(T_{db} - T_S)}{1094 + 0{,}44T_{db} - T_S} \qquad \text{Equação 30}$$

onde

Y = umidade específica, (libra de água/libra de ar seco)

Ys = umidade específica para saturação a Ts, (libra de água/libra de ar seco)

T_{db}= temperatura do bulbo seco, (°F)

Ts = temperatura de saturação adiabática, (°F)

e

$$Y_S = \frac{\rho_s}{1{,}61(\rho_t - \rho_s)} \qquad \text{Equação 31}$$

onde

ρ_s = pressão de vapor a Ts, (polegada de Hg)

ρ_t = pressão total, (polegada de Hg)

Para calcular a pressão relativa de vapor a T_{db}, é necessário calcular a pressão parcial ρ a T_{db} como segue:

$$\rho = \frac{1{,}61Y\rho_t}{1+1{,}61Y} \qquad \text{Equação 32}$$

e a pressão relativa de vapor *h* é:

$$h = \frac{\rho}{\rho^*} \qquad \text{Equação 33}$$

onde ρ^* é a pressão de vapor saturado a T_{db}, (polegada de Hg)

A umidade relativa (RH) é, então, definida como:

$$RH = h \times 100 \qquad \text{Equação 34}$$

A umidade relativa se refere à capacidade do ar em absorver umidade. O processo de secagem da madeira será tanto mais rápido quanto menor for a umidade relativa do ambiente, ou seja, maior a capacidade do ar em absorver a umidade evaporada.

A medida que a secagem se processa e a superfície da madeira torna-se mais seca, sua pressão de vapor diminui. Com temperaturas constantes de bulbo seco e bulbo úmido, as forças de secagem, dada pela diferença de pressão de vapor entre a superfície úmida da madeira e a pressão de vapor do ar circundante, também diminuirão. Para contornar a situação, existem

duas alternativas: a) aumentar a temperatura do bulbo seco, ou b) diminuir a umidade relativa do ar.

A maioria dos programas de secagem realmente apresentam valores de temperatura crescentes e uma redução progressiva na umidade relativa do ar, a medida que a madeira seca, de maneira a manter uma pressão diferencial de vapor durante o processo (BACHRICH, 1980).

A temperatura e a umidade relativa determinam uma condição climática dentro da estufa de secagem, conhecida como umidade de equilíbrio da madeira (HILDEBRAND, 1970; KOLLMANN & CÔTÉ, 1968). Esta corresponde ao teor de umidade que a madeira adquire quando exposta a certas condições propiciadas por aquelas duas variáveis. As curvas de umidade de equilíbrio da madeira e umidade relativa do ar, em função da variação das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido são encontradas com frequência na literatura (HILDEBRAND, 1970). Embora esses diagramas sejam de grande importância para a tecnologia de secagem, deve-se considerar que a umidade de equilíbrio é influenciada por uma série de fatores, como espécie, teor de extrativos, tratamento prévio do material, radiação gama, história da sorção, dentre outros (SKAAR, 1972). Dependendo da espécie podem ocorrer desvios de até ± 3% no teor de umidade.

Os valores de umidade de equilíbrio, expressos na forma de equações, algumas vezes são mais convenientes do que aqueles apresentados na forma de tabelas e gráficos. Uma das equações derivada das teorias de adsorção de água em materiais higroscópicos, que funciona particularmente bem, é a seguinte (SIMPSON, 1971):

$$UE = \frac{1800}{W}\left[\frac{K_1K_2h}{1+K_1K_2h} + \frac{K_2h}{1-K_2h}\right] \qquad \text{Equação 35}$$

onde,

UE = umidade de equilíbrio, %

h = pressão relativa de vapor = umidade relativa/100

T = temperatura do bulbo seco, °F

$W = 216{,}9 + 0{,}01961T + 0{,}005720T^2$

$K_1 = 3{,}730 + 0{,}03642T - 0{,}0001547T^2$

$K_2 = 0{,}6740 + 0{,}001053T - 0{,}000001714T^2$

A equação de SIMPSON (1971) prevê a estimativa dos parâmetros K_1, K_2 e W a partir da temperatura em graus Fahrenheit. Nos estudos de JANKOWSKY et al. (1986), os mesmos foram corrigidos para utilização da temperatura em graus Celsius, e ficaram assim:

$$W = 223{,}374 + 0{,}69309T + 0{,}01850T^2$$

$$K_1 = 4{,}737 + 0{,}04773T - 0{,}00050123T^2$$

$$K_2 = 0{,}70594 + 0{,}001698T - 0{,}000005553T^2$$

2.3.2. Sistema de ventilação e umidificação

O processo de secagem envolve a remoção de grandes quantidades de água da madeira. Essa umidade, após sair da madeira permanece na atmosfera da estufa, de onde precisa ser eliminada para o ambiente externo. Para que a secagem da madeira se processe de maneira adequada, a umidade relativa dentro da estufa deve ser precisamente controlada. Quando essa umidade é maior do que a desejada, o ar interno é substituído pelo ar externo mais seco através de aberturas conhecidas como janelas de ventilação. Em contrapartida, quando a umidade relativa dentro da estufa é menor do que a requerida, deve ser adicionada umidade através da pulverização de vapor ou de água atomizada.

a) Ventilação

O excesso de umidade do ar na estufa pode ser removida por meio de ventilação normal, utilizando os ventiladores de circulação de ar na estufa, ou por ventilação sob pressão com um ventilador adicional e tubulação.

Na ventilação normal, as janelas de ventilação são dispostas no teto, nos lados de entrada e de saída do ar dos ventiladores. Quando as janelas estão abertas, o ar fresco é aspirado no lado de sucção do ventilador e o ar úmido é forçado para fora da estufa no lado de pressão. Quando a direção de rotação dos ventiladores é invertida, o fluxo de ar através das janelas também é revertido. O tamanho e número de janelas de ventilação necessárias depende da espécie a ser seca, ou seja, da quantidade de água a ser removida da madeira. As estufas podem ter uma ou duas linhas de janelas operando na sua extensão, dependendo do arranjo dos ventiladores. Cada linha é automaticamente aberta e fechada por motores acionados

pneumaticamente ou eletricamente, ativados pelo sistema de controle. A ventilação estática é o método mais comum de ventilação usado atualmente em estufas de secagem.

Nos sistemas de ventilação sob pressão ou motorizado, as janelas localizadas no teto são substituídas por dois dutos de metais idênticos, colocados dentro da estufa, funcionando em toda a extensão na zona acima da posição dos ventiladores. Esses dutos ventilam para a atmosfera através de aberturas laterais. Aberturas ajustáveis ao longo do comprimento de cada duto regula o volume de ar introduzido ou retirado da estufa. Deste modo, o ar é distribuído uniformemente em toda a estufa. Um ventilador no extremo de cada duto atua alternando-se como aspirador ou exaustor, dependendo da direção de circulação do ar. Quando os ventiladores são invertidos, o sistema de ventilação também inverte, com as aberturas laterais acionadas para abrir imediatamente antes do funcionamento dos ventiladores. Esses sistemas são desenhados para exaurir o ar úmido que já tenha passado pela madeira e impulsionar o ar mais seco no lado de pressão do ventilador.

O sistema de ventilação de qualquer estufa, elimina um volume de ar maior do que o introduzido na estufa para ajustar a expansão em volume do ar mais frio que entra, a medida que ele é aquecido a temperaturas mais altas. No caso de ventilação motorizada, isto é acompanhado pelo desenho da aerodinâmica da hélice do ventilador. O mecanismo de ventilação é regulado pelo sistema de controle, como na ventilação normal de teto.

Quando a ventilação é usada para controlar o excesso de umidade no ar, quantidades substanciais de energia calorífica são jogadas fora ou desperdiçadas. Este fenômeno foi reconhecido durante algum tempo, porém a crise de energia dos anos 70 aumentou o interesse no desenvolvimento de trocadores de calor ou economizadores, para usar ou recuperar parte da energia exaurida nas aberturas de ar. Na metade dos anos 80, pelo menos um dos sistemas desenvolvidos tinha provado ser economicamente viável nas estufas de coníferas nos Estados Unidos: o pré-aquecimento do ar que entra na estufa através das janelas de ventilação. Outras melhorias do sistema são esperadas, visando o aumento da eficiência e economia de energia nas estufas de secagem nas próximas décadas.

b) Umidificação

O controle da temperatura do bulbo úmido, ou umidade relativa da estufa, é importante durante as fases de secagem, equalização e condicionamento da madeira. O controle rigoroso

da temperatura do bulbo úmido, é especialmente importante nos primeiros estágios da secagem de madeiras de folhosas propensas a rachaduras superficiais, e para minimizar rachaduras superficiais e de topo em algumas espécies de coníferas. Controle rigoroso das temperaturas de bulbo úmido também é importante durante a fase de condicionamento, realizado no final da secagem de qualquer espécie que necessite este tratamento para aliviar esforços.

Conforme mencionado anteriormente, quando a umidade relativa do ar ou a temperatura do bulbo úmido for menor que o valor desejado, adiciona-se umidade. Em estufas aquecidas a vapor, a umidade relativa do ar é usualmente fornecida na forma de pulverização de vapor. O vapor é injetado através de bicos especiais em uma linha de pulverização de vapor localizada na corrente de ar adjacente aos ventiladores de circulação, de maneira que a pulverização é misturada ao ar circulante antes de atingir a madeira. Como no sistema de aquecimento, a pulverização é regulada pelo sistema de controle.

Em algumas instalações que não dispõem de uma fonte de vapor para umidificação, utiliza-se a pulverização de água. A água deve ser injetada dentro da estufa na forma de uma névoa fina, preferencialmente pré-aquecida, uma vez que a água fria tem um apreciável efeito de resfriamento na estufa, e pode causar flutuação da temperatura do bulbo seco e controle insatisfatório das condições de secagem. Em algumas estufas, pulverizadores de água são usados em combinação com pulverizadores de vapor, mas são necessários cuidados extras para prevenir a queda de gotículas de água sobre a madeira, e a conseqüente formação de manchas.

2.3.3. Velocidade do ar

Outra influência significativa sobre a taxa de secagem, ao lado da temperatura e umidade relativa, é a velocidade do ar. Tanto na secagem em estufa como ao ar livre, a circulação do ar tem como finalidades a transferência de calor para a madeira, aquecendo a água nela contida, e a transferência da umidade da madeira para o ambiente (HILDEBRAND, 1970). Para que a secagem seja rápida e uniforme, é requerida uma circulação de ar suficiente e homogênea através da pilha de madeira. O tempo de secagem e a qualidade da madeira seca dependem, principalmente, da forma que o ar circula na estufa, e também da velocidade do ar e sua uniformidade.

Várias pesquisas tem sido realizadas na tentativa de determinar a velocidade do ar mais apropriada para secagem a altas temperaturas. Em estudos experimentais, TAYLOR &

MITCHELL (1987) secaram madeira verde de pinus sulinos a temperaturas de 129 a 149°C, utilizando velocidades de ar de 6 a 10 m/s. A análise de regressão múltipla evidenciou a influência da velocidade do ar, teor de umidade final e temperatura sobre o tempo de secagem da madeira. Para secar madeiras de pinus sulinos com espessuras entre 50 e 100 mm, KOCH (1974) utilizou temperatura de 115°C e velocidade do ar de 5 m/s. Já na secagem de material da mesma espécie em estufa de túnel contínuo, KOCH & WELLFORD (1977) utilizaram velocidades de ar variáveis por zona: 8,0 m/s na entrada; 1,5 m/s durante o condicionamento; e 5,0 m/s por ocasião do resfriamento.

BACHRICH (1980) considera que a velocidade do ar deve variar em função da largura da pilha de madeira. Na secagem de madeira de folhosas dispostas em pilhas de 1,8 a 2,0 m de largura, o autor recomenda velocidades baixas, em torno de 1,2 m/s; para pilhas entre 2,4 e 2,7 m de largura de madeira de coníferas e algumas folhosas de fácil secagem, sugere uma velocidade média de 2,0 m/s; e para pilhas de madeira de conífera com 2,7 m de largura, indica uma velocidade de 3,0 m/s, principalmente no caso de circulação do ar através de duas pilhas de madeira. Estes valores são comumente aplicados em processos de secagem convencional.

É comum a ocorrência de uma queda na temperatura do ar através da pilha, variável em função da espécie, largura da pilha, teor de umidade da madeira e velocidade do ar, dentre outras, que podem provocar uma secagem desuniforme. Examinando o efeito da velocidade do ar durante a secagem de madeira úmida, STEVENS & JOHNSTON (1957) constataram que o uso de altas velocidades e, principalmente, inversão periódica dos ventiladores, foram suficientes para minimizar este problema. De acordo com um trabalho de revisão elaborado por ARGANBRIGHT (1979), ventiladores reversíveis não são recomendáveis, mas parecem ser necessários em pilhas com largura superior a 2,4 m.

Não há um consenso sobre o tempo de inversão do fluxo de ar. Para BACHRICH (1980), os ventiladores devem ser invertidos a cada 2 ou 3 horas para evitar desgaste no motor; KOCH (1974b) entende que o fluxo de ar dever ser reversível a cada 75 minutos; e para ARGANBRIGHT (1979), os ventiladores devem ser invertidos após decorridos aproximadamente 2/3 do tempo de secagem.

Investigações de KOLLMANN & SCHNEIDER (1961), citadas por HILDEBRAND (1970), provaram que, no primeiro estágio de secagem, a influência da velocidade do ar sobre a taxa de secagem é máxima, tanto na secagem convencional como na alta temperatura. Já no segundo estágio, a influência da velocidade do ar é menor.

As estufas de secagem tem sido planejadas para que a velocidade do ar através da pilha de madeira não se altere durante a operação de secagem. Contudo, para tornar a secagem mais eficiente, são necessárias maiores velocidades de ar durante os estágios iniciais da secagem, quando a madeira está úmida e a quantidade de água a ser evaporada é grande. Nos estágios finais da secagem, conforme a madeira se torna mais seca e diminui a quantidade de água a ser evaporada, o uso de menores velocidades de ar é mais apropriado (SIMPSON, 1991).

Como o custo da energia elétrica tem crescido nas últimas décadas, tem aumentado o interesse na instalação de equipamentos de controle nos motores dos ventiladores, de maneira que a velocidade dos mesmos possam ser ajustadas durante a operação para reduzir os custos de energia. Um programa de velocidade variável, obtida através de um mecanismo de velocidade ajustável (ASD), desenvolvido no Canadá, apresenta uma redução líquida no consumo de energia e custos de ventilador de aproximadamente 50%. Este mecanismo permite variar o fluxo de ar durante todo o programa de secagem, do mesmo modo que é possível regular as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido (GARRAHAN et al., 1993).

Na prática, a questão econômica é decisiva para a escolha da velocidade do ar. Velocidades de 3,0 m/s ou maiores são economicamente vantajosas em certos casos, como para madeira úmida ou altas temperaturas de secagem. Todavia, HILDEBRAND, (1970) afirma que as velocidades de ar mais econômicas geralmente oscilam em torno de 2,0 m/s.

Embora seja recomendável um certo equilíbrio entre temperatura e velocidade do ar, deve-se considerar que esta última é mais importante nos estágios iniciais de secagem, decrescendo de importância a medida que a madeira se aproxima da umidade de equilíbrio. De um modo geral, o aumento na velocidade do ar será menos vantajoso quanto mais espessa for a madeira, menor a umidade inicial e mais baixa a temperatura utilizada.

2.3.4. Umidade da madeira

O conceito de madeira seca pode considerar teores de umidade entre 15 e 20%, para o método ao ar livre, até valores inferiores a 10% no caso da secagem controlada. Nas citações de literatura, o teor de umidade final recomendado para a madeira em serviço tem por objetivo reduzir ao mínimo as alterações higroscópicas e, deste modo, minimizar as variações dimensionais devido ao inchamento ou contração. As especificações em teor de umidade

dependem do uso final da madeira ou produtos de madeira, seja em ambientes internos ou externos, e também das condições climáticas.

Em geral, o teor de umidade final de um lote ou de uma carga de madeira submetida a secagem, é dado pela média dos valores das peças individuais e, portanto, variações entre elas são esperadas. Para reduzir essas variações, particularmente em madeiras submetidas a secagem em estufa, deve-se proceder, através de tratamento específico, a uniformização do teor de umidade. Como regra geral, uma amplitude de variação de 2% no teor de umidade entre as peças de madeira no final da secagem, é considerada boa (GALVÃO & JANKOWSKY, 1985).

Deveria ser prática comercial comum, secar a madeira até um teor de umidade médio final correspondente ao menor valor de umidade de equilíbrio observado para aquela situação de uso. Assim, durante o período de armazenamento, processamento ou uso, a madeira absorveria umidade, possibilitando uma distribuição mais uniforme e equalizada do teor de umidade.

Pesquisas sobre a variação sazonal do teor de umidade da madeira em uso tem sido conduzidas e publicadas em vários países. Mais importante do que as considerações teóricas, são as medições práticas do teor de umidade de equilíbrio, ao ar livre e em ambientes fechados, durante uma seqüência de vários anos.

2.4. INSTRUMENTAÇÃO DE CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM EM ESTUFA

2.4.1. Medição da temperatura

Durante a secagem, normalmente são medidas variáveis como a temperaturas de bulbo seco, a temperatura do bulbo úmido, a temperatura do ar na entrada e na saída da pilha e, eventualmente, a temperatura da própria madeira.

Termômetros elétricos digitais, que usam como sensores termopares ou detectores de temperatura por resistência (RTD), estão se tornando um meio bastante comum de medição de temperatura em estufas de secagem. Dos termopares usados dentro da estufa, o fio tipo T (cobre-constantan) é mais comum, embora o tipo J (ferro-constantan) e o tipo K (chromel-alumel) também sejam empregados. Alguns sensores termopares comerciais são revestidos de metal, assemelhando-se aos sensores RTD, os quais são, usualmente, do tipo platina.

De acordo com MACKAY & OLIVEIRA (1989), os sensores mais simples de serem usados são os termopares, que são colocados em número aproximado de 30 na estufa, espaçados de 2,5 a 3,0 m pelo lado de fora do carrinho e no local de cada bulbo seco dentro da estufa. Os fios termopares podem ser conectados a uma impressora-registradora, a qual está localizada num ambiente protegido, usualmente na sala de controle da estufa. A estufa é posta em funcionamento e a secagem prossegue, ou sob o controle direto do operador aplicando um tempo regular, ou um programa baseado no teor de umidade, ou sob o controle de um sistema computadorizado.

Os termopares medem a temperatura durante toda a operação e estes valores são impressos em intervalos regulares, de acordo com a duração do programa. Isto propicia meios de identificação das áreas de um programa que estão operando acima ou abaixo dos níveis de temperatura requeridos.

Os termômetros componentes podem ser considerados um tipo de potenciômetro, que convertem o sinal elétrico de um sensor para uma leitura digital. Esses termômetros elétricos podem ser adquiridos para funcionar com sensores termopares, sensores RTD, ou ambos, e, dependendo do modelo, podem monitorar de 1 a 12 pontos de medição. Alguns também oferecem a possibilidade de ter impressoras conectadas, de modo que os dados possam ser registrados. Deve-se salientar que a precisão dos sensores termopares oscila em torno de ± 1°C, e quando usados com termômetros mais baratos, a precisão combinada pode ser tanto quanto ± 2°C. Usando termômetros de melhor qualidade, esta variabilidade pode ser reduzida para aproximadamente ± 0,8°C.

Os sensores do detector de temperatura por resistência são considerados mais precisos do que termopares, e usando-os com termômetros de preço moderado, pode-se obter uma precisão em torno de ± 0,3°C. Esta informação deve ser levada em conta quando se compara valores de temperatura dos sensores localizados na mesma área da estufa, ou quando da comparação entre as leituras dos termopares do controlador-registrador.

A inspeção da temperatura na estufa de secagem, frequentemente é necessária para determinar as causas da secagem desuniforme, e as diferenças de temperatura entre as áreas próximas dos sensores de controle e outras áreas na estufa. Ocasionalmente pode ser necessário verificar se a temperatura indicada pelo sensor do controlador-registrador é um valor preciso. Para este fim, frequentemente são usados termômetros de mercúrio com uma escala graduada na haste de vidro, os quais devem ser colocados num determinado local da estufa para a tomada

das leituras de temperatura. Com esse tipo de termômetro, obviamente é necessário a entrada do operador na estufa para fazer as leituras. Deve-se tomar cuidado por ocasião da escolha do local para os termômetros da estufa, já que eles medem a temperatura mais quente percebida, mesmo para períodos muito curtos. Deste modo, existe uma predisposição para leitura de valores altos.

Em comparação com o termômetro de bolso, o potenciômetro é mais preciso, porém menos cômodo de transportar. A indicação de uma temperatura mais precisa deve-se à menor abertura para o ar e sua colocação próximo à área mais quente, no centro da pilha.

2.4.2. Medição da umidade relativa do ar

A umidade relativa na estufa de secagem pode ser obtida através de psicrômetros, que são instrumentos constituídos de dois termômetros para medir as temperaturas do bulbo seco e do bulbo úmido. Ambos devem ser colocados em locais por onde circula, com velocidade constante, o ar impulsionado pelos ventiladores.

O sensor de bulbo úmido precisa ser continuamente umedecido, e deve estar localizado numa posição na estufa, onde o fluxo de ar sobre a mecha ou pavio de algodão, propiciará uma adequada evaporação da água e, desse modo, o seu resfriamento. A mecha do bulbo úmido deve ser trocada após cada carga da estufa, ou mais frequentemente, caso ela se torne dura ou encrostada.

A diferença entre as duas temperaturas, é conhecida como depressão do bulbo úmido ou diferença higrométrica. Com o auxílio de equações, tabelas ou gráficos psicrométricos, as leituras do termômetro de bulbo seco e a depressão do bulbo úmido, possibilitam a obtenção da umidade relativa do ar.

No caso de um controlador-registrador, as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido são continuamente medidas, de forma que as condições da estufa sejam registradas num gráfico. Existe, tipicamente, apenas um sensor de temperatura de bulbo úmido numa estufa, porém pode haver múltiplos sensores de bulbo seco. Isto porque a temperatura de bulbo úmido é essencialmente a mesma em toda a estufa, mas a temperatura de bulbo seco pode variar consideravelmente no comprimento e na altura da estufa (SIMPSON, 1991).

Higrotermógrafos são instrumentos que medem e registram temperatura e umidade relativa do ar. São úteis em proporcionar o registro escrito contínuo, onde a temperatura não excede a aproximadamente 50°C.

2.4.3. Medição da umidade de equilíbrio

O controle dos programas de secagem que se baseiam no teor de umidade da carga, especialmente no caso de madeira serrada, pode ser realizado também através do teor de umidade de equilíbrio da atmosfera da estufa. De acordo com SIMPSON (1991) e MACKAY & OLIVEIRA (1989), um sensor mede diretamente a umidade de equilíbrio por medições da resistência elétrica, através de eletrodos fixados com grampo a uma pequena lâmina de madeira (wafer) ou chumaço de celulose montado na estufa.

Esta técnica já havia sido previamente comentada por HOLMES (1988). Ele observou que os sistemas de controle europeus usam um detector de umidade de resistência, dotados de sensores eletrônicos, para determinar o teor de umidade do ar. Uma corrente alternada é pulsada através de um pequeno "wafer" de papel absorvente (como uma superfície de papel mata-borrão) mantido entre dois grampos de metal na parede da estufa. A medida que o "wafer" adquire ou perde umidade para o ar, varia a quantidade de corrente que flui, o que pode ser traduzido na umidade relativa ou no teor de umidade de equilíbrio da madeira.

2.4.4. Medição da velocidade do ar

A velocidade do ar provavelmente pode variar mais do que qualquer outra coisa numa estufa, e essas variações tem um efeito muito maior sobre a taxa de perda de umidade e uniformidade do teor de umidade final que qualquer outra (HOLMES, 1988a).

De acordo com MACKAY & OLIVEIRA (1989), os instrumentos de medição para fluxo de ar, são de três tipos principais: anemômetros, velômetros e medidores de fluxo. Um tipo de anemômetro comumente usado, é conhecido como anemômetro de fio quente ou térmico. O fio no interior da sonda é aquecido por eletricidade a partir de uma bateria existente na unidade. Quando colocado numa corrente de ar, o fio aquecido é esfriado proporcionalmente à velocidade do fluxo de ar. As velocidades são indicadas diretamente em uma escala graduada

em metro por segundo ou pés/minuto. Esses instrumentos são muito precisos, porém caros, e deve-se tomar cuidados para evitar danos ao fio aquecido.

No tipo velômetro a corrente de ar entra no instrumento através de uma abertura ou tubo causando uma leve diferença em pressão estática, a qual é proporcional à velocidade do ar. As velocidades são indicadas diretamente numa escala graduada, em pés/minutos, e o instrumento é calibrado em função da temperatura, umidade relativa do ar e pressão.

O medidor de fluxo é um indicador de velocidade do ar muito simples e barato. Neste tipo de instrumento, o ar é dirigido sobre uma pequena esfera no centro de um tubo, e a altura que a mesma alcança no tubo é proporcional ao fluxo de ar, o qual é lido diretamente em metro/segundo ou pés/minuto.

SIMPSON (1991) se refere a mais dois tipos de anemômetros, que podem ser usados nos equipamentos de secagem de madeira. O anemômetro de deflexão, em que o ar entra no instrumento através de uma abertura ou veneziana, sendo a velocidade lida diretamente num mostrador graduado em m/s ou pé/minuto. Outro tipo eventualmente empregado é o anemômetro de hélice ou pá rotativa. O sensor deste instrumento é uma ventoinha de disco montada sobre um eixo de sustentação, equipado com um contador de revoluções. As velocidades de ar, em pé/minuto, são lidas diretamente em um mostrador analógico ou, em alguns modelos, digital.

2.4.5. Medição da umidade da madeira dentro da estufa

A medição da umidade da madeira dentro da estufa é necessária para a execução de programas de secagem baseados no teor de umidade da madeira e para a determinação do final do processo. Uma verificação exata do final da secagem é importante, uma vez que a secagem excessiva resulta em perdas significativas devido a empenamentos e gastos desnecessários com energia. A secagem insuficiente, por outro lado, pode produzir uma percentagem inaceitável de madeira, que não se enquadra na classificação de madeira seca, ou um aumento no custo de manipulação relacionado com a ressecagem.

Vários métodos de determinação do teor de umidade da madeira são citados na literatura (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968; HILDEBRAND, 1970). Entretanto, os métodos convencionalmente utilizados para monitorar o processo de secagem em secadores industriais, são a pesagem de amostras e medidores elétricos. Por esta razão, são apresentados a seguir os

instrumentos, equipamentos e metodologia comumente empregados para este fim, bem como suas características e viabilidade de uso na secagem de madeira serrada.

2.4.5.1. Pesagem de amostras

O controle do teor de umidade de uma carga de madeira durante o processo de secagem, tradicionalmente é realizado através da pesagem de amostras de controle As amostras, distribuídas estrategicamente na pilha, são removidas periodicamente da estufa e pesadas manualmente para estimar o teor de umidade.

Embora o procedimento manual seja ainda o mais utilizado, começam a ser desenvolvidos alguns métodos automatizados, como a medição da resistência elétrica das amostras através de sensores, e o uso de células de carga pequenas para pesa-las continuamente. Tanto o sinal da resistência elétrica como os pesos da célula de carga podem ser alimentados dentro de um sistema de controle computadorizado para alterar automaticamente as condições da estufa.

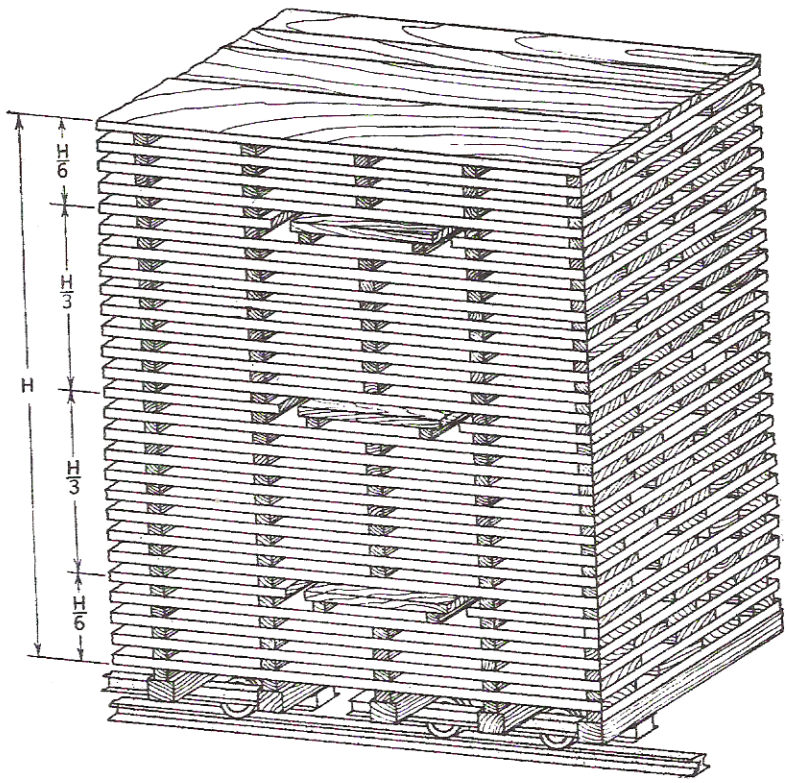
O princípio mais importante a ser observado na seleção, é que as amostras de controle sejam representativas da madeira que está na estufa. É impraticável monitorar a umidade de todas as tábuas numa estufa, de maneira que as amostras selecionadas precisam representar a madeira e sua variabilidade. O ideal na seleção das tábuas, a partir das quais serão confeccionadas as amostras de controle, seria levar em consideração todos os fatores que influem na qualidade e na taxa de secagem. Como isso geralmente não é possível nem prático, deve-se considerar principalmente a taxa de secagem do material que seca mais lento. O melhor momento para selecionar as tábuas é durante o empilhamento. Algumas são escolhidas para representar as mais densas, mais úmidas e mais espessas, e as que contém relativamente alta percentagem de cerne.

Quanto à distribuição, o importante é que as amostras sejam espalhadas em toda a estufa a várias alturas e distâncias dos extremos da pilha de madeira. Depois de confeccionadas, pintadas nos topos e pesadas, as amostras de controle são colocadas na lateral da pilha, em uma posição onde possam ser facilmente removidas e repostas durante o processamento de secagem (Figura 4). Os espaços previamente preparados na pilha para a colocação das amostras de controle, ficam usualmente ao longo do comprimento da estufa, nos lados mais próximos das paredes. Como as amostras de controle são representativas da madeira que está sendo seca, elas

devem ser expostas permanentemente as mesmas condições de secagem, caso contrário fornecerão uma estimativa falsa do teor de umidade da carga de madeira.

O número de amostras necessárias na carga depende da condição e características da madeira em secagem, do desempenho da estufa e do uso final da madeira. Embora alguns estudos tenham demonstrado preocupação com o número de amostras (FELL & HILL, 1980; HOLMES & ARGANBRIGHT, 1976), os resultados não foram conclusivos. Seguindo uma regra prática, RASMUSSEN (1961) recomenda o uso de pelo menos 4 amostras em cargas de aproximadamente 50 m³, ou menos. Para cargas de 250 m³ ou mais, 10 a 12 amostras são usualmente suficientes. No caso do uso de três amostras, BROWN & BETHEL (1975) recomendam distribuí-las nos terços superior e inferior, e na metade da altura da pilha de madeira (Figura 4).

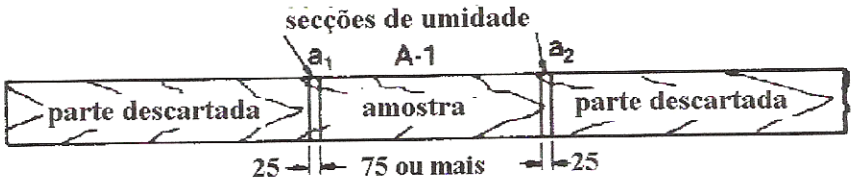
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DE AMOSTRAS DE CONTROLE EM UMA PILHA DE MADEIRA



Fonte: BROWN & BETHEL (1975)

As amostras de controle são preparadas a partir de tábuas utilizadas para compor a carga de madeira, conforme esquema apresentado na Figura 5. Usualmente, cada tábua selecionada dará origem a apenas uma amostra de controle, para assegurar que as mesmas sejam representativas do material componente da carga. Os procedimentos adotados são descritos por RASMUSSEN (1961).

FIGURA 5 - MÉTODO DE CONFECÇÃO DE UMA AMOSTRA DE CONTROLE



Fonte: RASMUSSEN (1961), SIMPSON (1991).

A amostra de controle deve ser confeccionada aproximadamente do centro da tábua, com um comprimento de aproximadamente 80 cm. Dos extremos da amostra de controle, e simultaneamente à sua confecção, são cortadas duas seções de aproximadamente 25 mm de largura (Figura 5.). Gravimetricamente é determinado o teor de umidade de cada uma delas, e através da média aritmética das duas seções obtém-se o valor médio, que corresponde ao teor de umidade inicial da amostra de controle.

A medida que o processo de secagem progride, as condições da estufa são alteradas com base no teor de umidade das amostras em vários momentos durante a operação. A frequência com que as amostras precisam ser pesadas depende da taxa de perda de umidade, e quanto mais rápido a madeira perde umidade, mais frequentemente as amostras precisam ser pesadas.

O conhecimento prévio do teor de umidade inicial e peso úmido das amostras, bem como a pesagem periódica das mesmas, possibilita a determinação do teor de umidade a qualquer momento, através da seguinte equação:

$$TUa = \frac{Pa(TUi + 100)}{Pu} - 100 \qquad \text{Equação 36}$$

onde,

TUa = teor de umidade atual da amostra, %

TUi = teor de umidade inicial da amostra, %

Pa = peso atual da amostra, g

Pu = peso úmido ou inicial da amostra, g.

O teor de umidade da carga de madeira é dado pela média dos valores obtidos para as amostras de controle. Os valores determinados através das amostras, permitem ao operador alterar as condições da estufa a partir do programa de secagem elaborado em função do teor de umidade.

É óbvio que o método de pesagem de amostras seria difícil de ser usado onde são empregados empilhadores automáticos. Por outro lado, já que o acesso à estufa é necessário, ele pode ser usado apenas quando a temperatura da estufa é baixa o suficiente para permitir a entrada do operador, e jamais em estufas de queima direta, onde a atmosfera da estufa é nociva.

2.4.5.2. Pesagem da carga de madeira

Este método de monitoramento de umidade deriva do anterior, e consiste da utilização de uma célula de carga para pesagem da carga de madeira durante sua secagem. As células de carga comumente usadas são do tipo compressão, as quais são colocadas sob a pilha de madeira, de modo a possibilitar a obtenção periódica do peso da mesma pelo alívio da pressão a medida que o teor de umidade da madeira diminui. Entretanto, o uso de células de carga dentro da estufa, submetidas a condições severas de temperatura e umidade relativa do ar utilizadas no processo, depreciam a sensibilidade do equipamento. Uma alternativa que evita esses problemas, é o uso de células de carga de tração, que mantém a carga de madeira suspensa superiormente. Neste caso, a frequente perda de massa da carga, corresponde à diminuição do teor de umidade da madeira.

Estufas de laboratório, como a utilizada por LITTLE et al. (1986), são frequentemente desenhadas de maneira que toda a carga se apoie sobre um sistema de pesagem, de modo que a perda de peso possa ser medida continuamente durante a operação de secagem. Para que o teor de umidade possa ser calculado periodicamente, é imprescindível a determinação razoavelmente

precisa do teor de umidade inicial da carga. Até o presente, não é conhecido o uso comercial deste método (MACKAY & OLIVEIRA, 1989; QUARLES & BREINER, 1992).

WENGERT (1992) considera que uma alternativa seria pesar parte da carga da estufa - usualmente uma pilha - com células de carga colocadas nos trilhos do carrinho. Todavia, a sensibilidade à temperatura e a longa exposição do equipamento de medição tem resultado em problemas, a nível de pesquisa e comercial.

Sistemas de controle para estufas de secagem baseados na pesagem periódica, de parte ou de toda a carga de madeira, com o uso de células de carga, tem sido relatados por WENGERT & EVANS (1971), ARGANBRIGHT (1979) e SCHNEIDER et al. (1979). TAYLOR (1978) descreve um sistema portátil e simples, usado para pesar a carga antes, durante e depois da secagem. BOGDANOV et al. (1989) revisaram métodos e princípios de monitoramento, por meio de pesagem, do teor de umidade médio da pilha de madeira durante a secagem em estufa, e propuseram uma alternativa que envolve pesagens repetidas da carga em intervalos pré-fixados. AGAPOV (1977) desenvolveu uma equação que relaciona o teor de umidade médio da pilha de madeira com o peso inicial, teor de umidade inicial e peso no momento da medição.

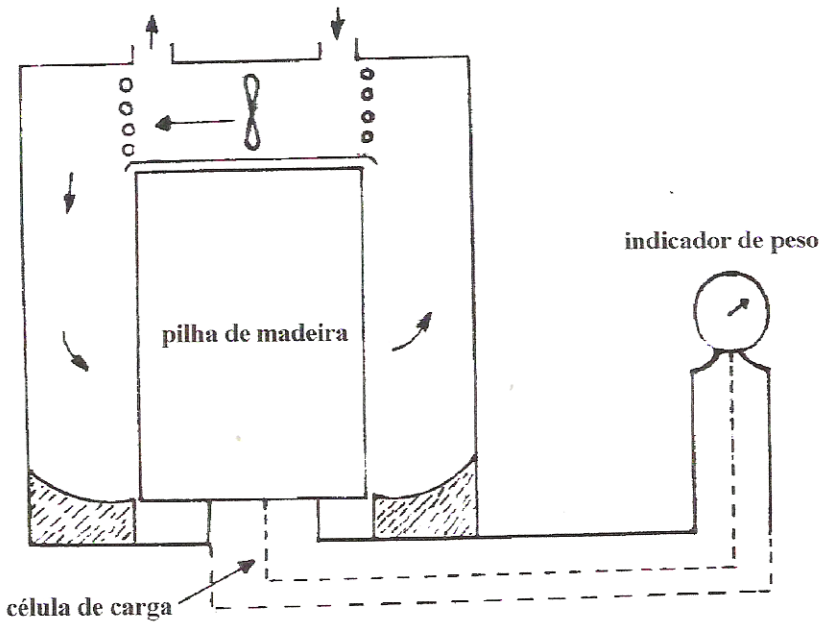
Um sistema de controle de estufa de secagem completamente automático, baseado na medição do teor de umidade através da pesagem da carga com o uso de células de carga, é descrito por WENGERT & EVANS (1971). Os sinais elétricos das células de carga acionam o cilindro giratório de um programador de via dupla, que contém as curvas de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido versus o teor de umidade. Para tanto, é necessário cortar amostras a partir das tábuas componentes da pilha para estimar o teor de umidade inicial da carga.

O sistema proposto por WENGERT & EVANS (1971), embora mais caro do que os sistemas convencionais, apresenta várias vantagens. A mais importante delas parece ser o fato que o sistema pode responder automaticamente, de maneira rápida ou lentamente, a uma determinada carga em secagem. A aceitação final de tais sistemas dependerá, indiscutivelmente, de sua eficácia na diminuição no tempo de secagem. A Figura 6 ilustra esquematicamente o método de pesagem da carga de madeira, através de células de carga de compressão.

Para proceder a determinação periódica da umidade da madeira, é necessário o conhecimento prévio do teor de umidade inicial da carga de madeira. Os procedimentos adotados para a obtenção desta variável, são aqueles recomendados por MACKAY & OLIVEIRA (1989), com a condição de que o número de seções de umidade e de amostras

utilizadas, sejam representativas da carga de madeira. O teor de umidade da carga de madeira é calculado periodicamente através da Equação 36.

FIGURA 6 - MÉTODO DE PESAGEM DA CARGA DE MADEIRA ATRAVÉS DE CÉLULA DE CARGA (ADAPTADO DE SCHNEIDER et al., 1979).



2.4.5.3. Medidores elétricos tipo resistência ou condutância elétrica

O desenvolvimento do primeiro medidor de umidade tipo resistência, bem sucedido, foi baseado no trabalho conduzido por Stamm, em 1927, que foi o primeiro a obter uma medição quantitativa da relação entre o teor de umidade da madeira e sua resistividade elétrica, apesar de Meyer & Rees, um ano antes, também anteverem a possibilidade de invenção do medidor de resistência elétrica para medição do teor de umidade da madeira (SKAAR, 1972).

Um medidor de resistência é projetado para medir a resistência elétrica entre dois pontos numa peça de madeira. A resistência é usualmente medida entre dois eletrodos ou agulhas, os quais são fincados na madeira de maneira a permanecerem alinhados ao longo da grã (VILLIERE, 1966), ou perpendicular a ela (VERMAAS, 1982b).

As agulhas podem ser de dois tipos principais: com isolamento e sem isolamento. Os isolados são úteis para evitar falsas leituras, se a superfície da madeira for umedecida pela chuva ou orvalho. Quando pinos isolados, exceto nas pontas, são fincados a diferentes profundidades na madeira, podem fornecer também algumas indicações de gradientes de umidade.

Eletrodos isolados podem ser de qualquer comprimento, e suas características de identificação é por eles serem revestidos com um verniz não condutor ao longo de seu comprimento, exceto na ponta ou nos últimos 3 mm. O resultado disso é que a resistência, e consequentemente o teor de umidade, é medida apenas entre as pontas dos eletrodos. Conforme os pares de agulhas são fincados na madeira para diversas distâncias, o teor de umidade a várias profundidades pode ser determinado (MACKAY & OLIVEIRA, 1989).

Eletrodos de dois pinos são comumente usados para madeira serrada, moirões ou postes. Eletrodos com pinos isolados, de 25 mm de comprimento, são os mais comumente usados. Ainda são usados pinos curtos de 8 mm sem isolamento, que quando inseridos na profundidade adequada, fornecem um teor de umidade médio preciso para material de até 50 mm de espessura (SIMPSON, 1991). Em seus estudos, VERMAAS (1982b) usou eletrodos tipo pino de aço inoxidável de 10 mm de comprimento, com espaçamento de 21 mm, introduzidos na face tangencial da madeira, de modo que a direção do fluxo de corrente fosse transversal à grã.

JAMES (1964) enfatiza a importância dos medidores de umidade tipo resistência, como ferramenta de determinação do teor de umidade da madeira. Contudo, para que as leituras desses instrumentos sejam confiáveis, salienta que vários fatores como espécie, temperatura, gradiente de umidade e tratamentos químicos, devem ser considerados. Numa revisão sobre as literaturas existentes, VERMAAS (1975a) observa que além das variáveis da madeira, como teor de umidade e sua distribuição, concentração de íons, direção da grã, lignina, extrativos, teor de cinzas, densidade e espécie, a medição da resistência sob corrente contínua da madeira também é afetada por variáveis experimentais. Em trabalho posterior, VERMAAS (1975b) informa que as variáveis experimentais mais importantes são o gradiente de voltagem, tempo de eletrificação, eletrodos ou material de contato, força aplicada na amostra, formato e dimensões da amostra, voltagem residual e temperatura.

Os valores de resistência, geralmente são obtidos a partir de madeira com teor de umidade uniforme. Usualmente, contudo, ocorrem gradientes de umidade dentro da madeira. A influência dos gradientes de umidade sobre as leituras dos medidores, pode ser substancial e

conduzir a sérios erros (JAMES, 1984). No processo de secagem normal, durante o qual é desejável monitorar o teor de umidade, as camadas externas da madeira normalmente estão mais secas do que as do interior. Para minimizar este inconveniente, nos medidores tipo condutância recomenda-se que os pinos dos eletrodos sejam introduzidos na madeira até uma profundidade entre 1/4 e 1/5 da espessura, na suposição que o teor de umidade a esta profundidade corresponde ao valor médio para a seção transversal (MACKAY, 1976b; JAMES, 1984; WENGERT, 1992). Os pinos podem ser de comprimentos diferentes, de modo a possibilitar avaliações a cerca do gradiente de umidade da madeira (SIMPSON, 1991; JAMES, 1994).

A credibilidade dos medidores tipo resistência, é geralmente boa na faixa de teor de umidade higroscópico. SKAAR (1972) enumera três fatores que contribuem para a redução de sua confiabilidade, acima do PSF. Primeiro, a variação da resistividade com o teor de umidade é relativamente pequena acima do PSF e a sensibilidade dos medidores é muito reduzida. Segundo, a variação no conteúdo de eletrólitos na água da cavidade celular entre tipos de madeira, e mesmo de um ponto na madeira para outro na mesma amostra, causa grandes variações em resistividade. Terceiro, os efeitos dependentes do tempo tornam-se mais pronunciados a altos teores de umidade. Em outras palavras, o valor aparente da resistividade sob corrente contínua, muda substancialmente com o tempo após a aplicação de voltagem (SKAAR, 1964).

Os medidores tipo resistência são mais úteis naquela parte da faixa de umidade higroscópica, entre 6 ou 7% e 25 a 30% de teor de umidade, à temperaturas ambiente (SKAAR, 1972). Por esta razão é que a maioria dos pesquisadores citam o intervalo entre 6 a 25% (MACKAY & OLIVEIRA, 1989; CHEN et al., 1994) ou 7 a 30% (MACKAY, 1976a; HOLMES & FORRER, 1989; LUM, 1994) como os mais adequados para medir com precisão o teor de umidade através da técnica de resistência elétrica. Quando a madeira está mais seca que isso, a resistividade é muito alta para ser medida com medidores de umidade comerciais comuns, e quando a madeira está muito úmida, as alterações em resistividade são muito pequenas para permitir medições precisas.

A resistividade elétrica varia em função do tipo de madeira, para um mesmo teor de umidade acima do PSF. Ocorrem, também, variações entre madeiras, com respeito a suas resistividades a correspondentes teores de umidade na faixa higroscópica. Devido a esta variação entre madeiras, é necessário obter dados de calibração para várias espécies, os quais

conduzir a sérios erros (JAMES, 1984). No processo de secagem normal, durante o qual é desejável monitorar o teor de umidade, as camadas externas da madeira normalmente estão mais secas do que as do interior. Para minimizar este inconveniente, nos medidores tipo condutância recomenda-se que os pinos dos eletrodos sejam introduzidos na madeira até uma profundidade entre 1/4 e 1/5 da espessura, na suposição que o teor de umidade a esta profundidade corresponde ao valor médio para a seção transversal (MACKAY, 1976b; JAMES, 1984; WENGERT, 1992). Os pinos podem ser de comprimentos diferentes, de modo a possibilitar avaliações a cerca do gradiente de umidade da madeira (SIMPSON, 1991; JAMES, 1994).

A credibilidade dos medidores tipo resistência, é geralmente boa na faixa de teor de umidade higroscópico. SKAAR (1972) enumera três fatores que contribuem para a redução de sua confiabilidade, acima do PSF. Primeiro, a variação da resistividade com o teor de umidade é relativamente pequena acima do PSF e a sensibilidade dos medidores é muito reduzida. Segundo, a variação no conteúdo de eletrólitos na água da cavidade celular entre tipos de madeira, e mesmo de um ponto na madeira para outro na mesma amostra, causa grandes variações em resistividade. Terceiro, os efeitos dependentes do tempo tornam-se mais pronunciados a altos teores de umidade. Em outras palavras, o valor aparente da resistividade sob corrente contínua, muda substancialmente com o tempo após a aplicação de voltagem (SKAAR, 1964).

Os medidores tipo resistência são mais úteis naquela parte da faixa de umidade higroscópica, entre 6 ou 7% e 25 a 30% de teor de umidade, à temperaturas ambiente (SKAAR, 1972). Por esta razão é que a maioria dos pesquisadores citam o intervalo entre 6 a 25% (MACKAY & OLIVEIRA, 1989; CHEN et al., 1994) ou 7 a 30% (MACKAY, 1976a; HOLMES & FORRER, 1989; LUM, 1994) como os mais adequados para medir com precisão o teor de umidade através da técnica de resistência elétrica. Quando a madeira está mais seca que isso, a resistividade é muito alta para ser medida com medidores de umidade comerciais comuns, e quando a madeira está muito úmida, as alterações em resistividade são muito pequenas para permitir medições precisas.

A resistividade elétrica varia em função do tipo de madeira, para um mesmo teor de umidade acima do PSF. Ocorrem, também, variações entre madeiras, com respeito a suas resistividades a correspondentes teores de umidade na faixa higroscópica. Devido a esta variação entre madeiras, é necessário obter dados de calibração para várias espécies, os quais

são então usados para corrigir as leituras obtidas, diretamente a partir do medidor de umidade. Segundo JAMES (1964), os medidores de umidade elétricos usualmente são calibrados para uma determinada espécie, e para as demais são fornecidas tabelas de correções. Nos Estados Unidos, esses aparelhos comumente são calibrados para Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), e os fatores de correção para espécies nativas raramente excedem a 1 a 2% do teor de umidade, para leituras efetuadas através de medidores tipo resistência. Esses dados de calibração normalmente são fornecidos pelos fabricantes. Fatores de correção para espécies e temperatura de madeira, usados para ajustar o teor de umidade obtido através de medidores elétricos, são comumente apresentados na literatura (MILOTA, 1991; SMITH, 1992; SIMPSON & LOEHNERTZ, 1994).

KEYLWERTH & NOACK (1956) não encontraram uma relação específica entre densidade da madeira e resistência elétrica, mas em geral parece que esta última diminui com o aumento da primeira (VENKATESWARAN, 1973). Resultados semelhantes a estes foram obtidos por VERMAAS (1982b).

SKAAR (1972) acredita que o fator isolado mais importante, que afeta a resistividade elétrica da madeira, ao lado do teor de umidade, é a temperatura. Segundo JAMES (1968), o efeito da temperatura sobre as leituras dos medidores tipo resistência, foi estudado por vários pesquisadores, como Stamm (1927), Clark & Williams (1933), Davidson (1958), Keylwerth & Noack (1956), dentre outros. O efeito marcante da temperatura, provavelmente está relacionado à energia de ativação, que é a energia requerida para dissociar íons condutores na madeira (VERMAAS, 1982a).

As leituras dos medidores de umidade tipo resistência elétrica, além das variáveis já discutidas, podem ser influenciadas pela presença de produtos preservativos ou retardantes de fogo na madeira. Pequenas quantidades de impurezas inorgânicas na parede celular, podem diminuir significativamente a resistência (SIAU, 1971). De acordo com JAMES (1966), muitos desses tratamentos são a base de sais inorgânicos, que podem agir como eletrólitos e, deste modo, alterar as propriedades elétricas da madeira. Em seus trabalhos, o autor verificou que o efeito dos preservativos sobre as leituras dos medidores de umidade elétricos, foi praticamente negligenciável a baixos teores de umidade, mas o efeito dos preservativos tipo sais solúveis, aumentou rapidamente com o aumento do teor de umidade. A utilidade dos medidores de umidade elétricos, em conseqüência disso, é severamente limitada por preservativos de madeira

que alteram as propriedades elétricas da madeira; apenas a níveis de umidade inferiores a 8 ou 9%, as leituras sobre essas madeiras tratadas são confiáveis.

Os medidores de umidade tipo resistência corrente contínua, atualmente disponíveis para monitorar o teor de umidade da madeira durante a secagem em estufa, apresentam alguma forma de limitação quanto a precisão, causada pela falta de uma adequada compensação de temperatura, inadequada calibração em função da espécie, e/ou inaptidão para operar continuamente. A dificuldade de operação contínua, como seria necessário para controle de estufas de secagem, é causada pelos efeitos de polarização e eletrolise nos eletrodos, e embora alguns fabricantes tenham incluído contramedidas em seus equipamentos, muito pouco tem sido publicado sobre a técnica empregada (FORRER & VERMAAS, 1987).

Neste método, o teor de umidade da madeira é medido através de um conjunto de pares de eletrodos inseridos dentro de orifícios, perfurados a uma ou mais profundidades em algumas das tábuas que compõem a carga da estufa, como ilustrado na Figura 7 (MACKAY & OLIVEIRA, 1989). O princípio de medição é quase idêntico àquele dos medidores de umidade manuais, porém, no caso da medição contínua, sensores fincados na madeira são ligados de forma permanente a um sistema de comando, através de cabos elétricos coaxiais. Relações empíricas e experiência, são úteis na interpretação da leitura e determinação do teor de umidade (WENGERT, 1992).

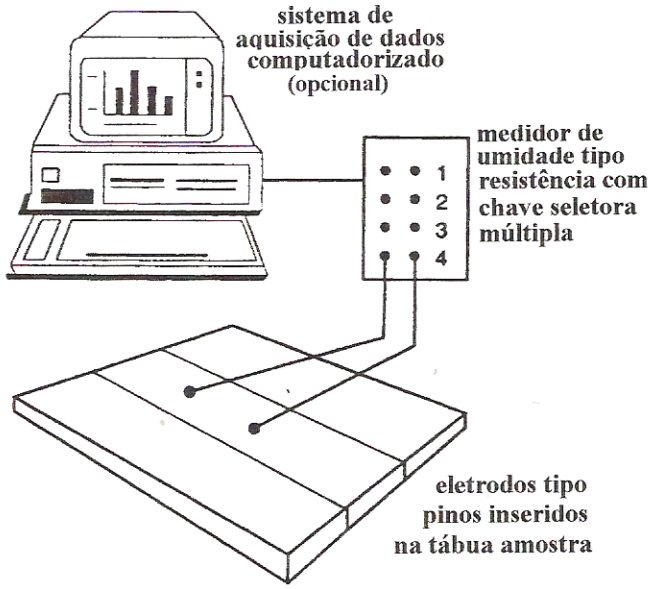
As limitações deste tipo de controle incluem a imprecisão de sistemas tipo resistência acima do PSF. WENGERT (1992) lembra que a medição da umidade acima de 30% com medidores tipo resistência elétrica é insegura, devido a uma correlação irregular entre resistência e teor de umidade nesses níveis. Sob condições simuladas, FORRER & VERMAAS (1987) tentaram desenvolver um novo medidor capaz de medir precisamente o teor de umidade entre 8 e 75%. Admitiram, contudo, que na prática, leituras acima do PSF seriam consideradas apenas como "úteis". Além disso, a seleção de tábuas amostras para representar adequadamente toda a carga, e sua localização na pilha, influencia claramente a precisão do sistema.

Até recentemente apenas os controladores europeus usavam estes medidores, mas agora eles estão sendo usados também por algumas firmas americanas (HOLMES, 1988).

Os fabricantes de sistemas de controle europeus e americanos usam microprocessadores ou computadores, para armazenar uma seleção de programas baseados no tempo ou no teor de umidade. O computador também calcula, continuamente, novos ajustes para umidade de equilíbrio e temperaturas de secagem, dependendo do teor de umidade médio ou tempo, e

coletam e armazenam dados sobre as condições de secagem e consumo de energia, de modo a subsidiar as decisões sobre o controle operacional do processo de secagem (MACKAY & OLIVEIRA, 1989).

FIGURA 7 - MONITORAMENTO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA COM MEDIDORES ELÉTRICOS RESISTIVOS



Fonte: MACKAY & OLIVEIRA (1989).

2.4.5.4. Medidores dielétricos capacitivos

O medidor de umidade tipo capacitância, mede a capacitância elétrica C entre dois eletrodos, onde a madeira é o material dielétrico. A capacitância C é proporcional à constante dielétrica, como mostra a relação:

$$C = k.\varepsilon \qquad \text{Equação 37}$$

onde,

C = capacitância

ε = constante dielétrica

k = coeficiente de proporcionalidade

O coeficiente de proporcionalidade k é determinado pela natureza dos eletrodos e o tipo de ligação elétrica com a madeira. O coeficiente de contato pode ser constante para uma determinada configuração de eletrodo, no caso da relação C/ε ser constante, ou pode ser uma função de ε. Por exemplo, esta última situação seria verdadeira se o contato dos eletrodos com a madeira fosse através de um espaço de ar. A configuração do eletrodo é um aspecto importante do desenho e precisa ser um compromisso entre os fatores de uso prático e as considerações ideais.

A capacitância medida não depende apenas do teor de umidade da madeira, mas também da sua densidade. Deste modo, é necessário ter uma curva de calibração para uma determinada espécie, com base na densidade média da madeira. Além disso, as apreciáveis variações em densidade, que ocorrem dentro de uma determinada espécie, também causará variações similares no teor de umidade medido. Em princípio, o medidor de umidade tipo capacitância pode ser usado para todas as faixas de teor de umidade, desde madeira seca até a completa saturação. Contudo, devido ao fator de perda excessivamente elevado a altos teores de umidade, é difícil fazer medições significativas nesta faixa, a menos que sejam tomadas providências especiais para o contato de ar entre os eletrodos e a madeira.

Nesse sistema, os elementos sensores consistem de tiras de metal fino, as quais são colocadas dentro do espaço dos sarrafos (Figura 8), a uma determinada altura acima do chão. Segundo MACKAY & OLIVEIRA (1989), podem ser colocadas até 9 ao longo do comprimento de um carro dentro da estufa. Um cabo flexível liga o sistema de comando, a partir da sala de controle, a cada um dos sensores, os quais recebem um sinal elétrico e o circuito é completado do sensor para o piso ou trilho da estufa. O monitor na sala de controle mostra um valor de teor de umidade para cada um dos pontos onde estão os sensores, ou uma média de todos os sensores em uso.

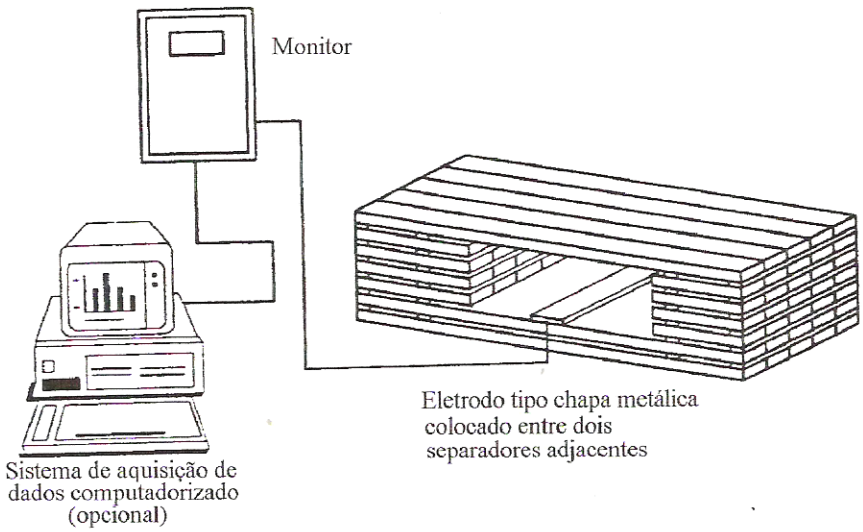
O medidor de umidade tipo capacitivo usado dentro da estufa mede a admitância capacitiva da carga de madeira através de um sinal de audiofrequência, que é conduzido por um cabo coaxial para uma tira de alumínio inserida dentro da pilha de madeira gradeada. A tira de alumínio é fixada em um espaço entre camadas de tábuas, sendo que a parte da carga que ela pode monitorar corretamente não foi definitivamente estabelecida (QUARLES & BREINER, 1992).

Dentre as principais características desses medidores, pode-se citar as seguintes:

- as leituras são grandemente influenciadas pela fileira de madeira onde o sensor se encontra;

- o teor de umidade da superfície da madeira naquela fileira, tem um importante impacto sobre as leituras; e
- as peças mais úmidas em contato com o sensor tem um efeito predominante sobre as leituras.

FIGURA 8 - MONITORAMENTO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA COM MEDIDORES DIELÉTRICOS CAPACITIVOS



Fonte: MACKAY & OLIVEIRA (1989).

O sistema também pode ser integrado dentro de uma pilha de controle da estufa, embora ele possa ser necessário para operar com um programa baseado no tempo, até que as leituras alcancem um teor de umidade em torno de 30%. De acordo com HOLMES (1988), os aparelhos podem ser programados para desligar automaticamente a estufa quando o final da secagem é alcançado, ou sinalizar ao operador quando é apropriado inspecionar o teor de umidade.

De acordo com WENGERT (1992), uma placa de metal colocada numa pilha de madeira gradeada, de madeira é usada para medir a reatância elétrica (resistência e capacitância). A medida que a madeira seca, a reatância varia, e pode ser empiricamente relacionada ao teor de umidade da madeira, próximo à placa. O Laboratório de Produtos Florestais dos Estados Unidos verificou que os monitores capacitivos trabalharam igualmente bem, tanto em coníferas como em folhosas, e para diferentes tamanhos e espécies. Em todos os casos, foi necessário calibragem empírica.

JAMES & BOONE (1982) tentaram tornar mais clara a compreensão dos princípios básicos que governam o funcionamento de monitores de estufa tipo capacitância, visando a otimização de seu desenho e aplicação. Concluíram que eles podem propiciar informações úteis ao operador da estufa, contanto que variáveis como temperatura e distribuição de umidade, que afetam as leituras do medidor, sejam reconhecidas e consideradas.

Os resultados de QUARLES & BREINER (1992) mostraram que o medidor de umidade usado dentro da estufa, foi tão exato quanto outros medidores de umidade em série ou manuais, tipo dielétrico e resistência. A temperaturas constantes, o coeficiente de determinação R^2 para a análise de regressão linear foi superior a 0,95, e para o intervalo de confiança de 95% foi aproximadamente ± 3% de teor de umidade para material equalizado na estufa. A temperatura teve um efeito significante sobre a operação do medidor e, em conseqüência, esta variável precisa ser considerada, quer para determinação da relação usando as técnicas de regressão, quer para manutenção da mesma temperatura na conclusão de cada operação. Usando as técnicas de regressão múltipla, foi obtido um R^2 de 0,94, indicando que é possível uma relação matemática entre temperatura e leituras do medidor.

RHEMREV et al., (1991) utilizaram um medidor tipo capacitância, que usa a relação entre o teor de umidade e uma constante dielétrica, para medir o gradiente de umidade longitudinal de ripas de *Calocedrus decurrens*. Através do monitor de um computador, o operador da estufa analisa os gradientes de teor de umidade médio, desde o extremo da peça até o seu centro. Assim, se o gradiente estiver muito acentuado, significa que a carga ainda não está seca. Por outro lado, gradientes suaves, quase horizontal, geralmente após a equalização e condicionamento, indicam que a secagem da carga está concluída.

2.4.5.5. Medidores dielétricos tipo perda de potência

O medidor perda de potência, tipo mais comum de medidor de umidade dielétrico, mede a potência elétrica absorvida por uma determinada amostra de madeira, quando eletrodos de uma configuração padrão e eletrodos de contato são usados. A perda de potência P na amostra é proporcional a constante dielétrica ε, e também ao fator de potência $tg\ \delta$, como mostrado abaixo:

$$P = (K\varepsilon)(\text{tg}\ \delta) \qquad \text{Equação 38}$$

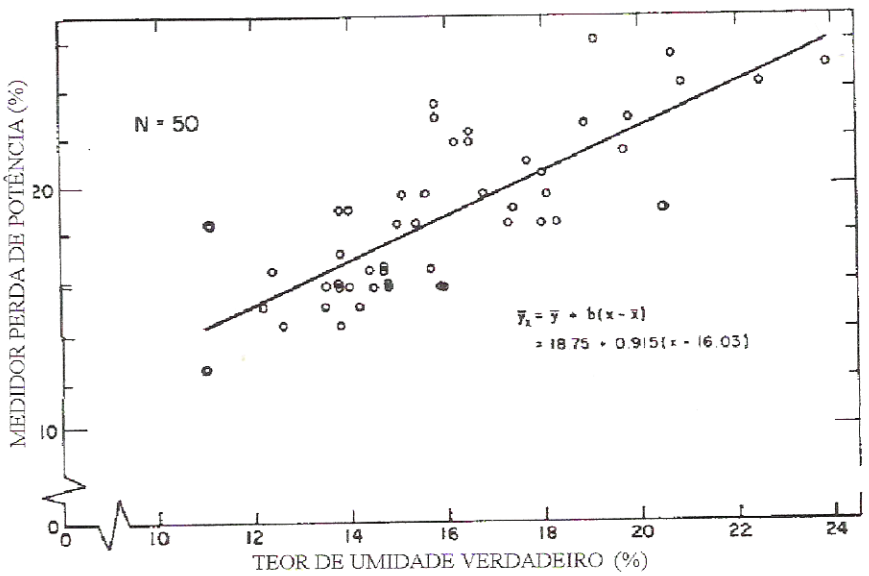
onde,

K = coeficiente de proporcionalidade.

A partir da Equação 38, é evidente que o valor de P é dependente de ε, bem como de $tg\ \delta$, e que fatores similares do eletrodo estão envolvidos, como nos medidores tipo capacitância. Por esta razão, é necessário calibrar o medidor perda de potência para diferentes tipos de madeira, particularmente com respeito a densidade.

A variação das leituras do medidor perda de potência a partir do teor de umidade médio verdadeiro, é claramente ilustrada na Figura 9. Na análise de regressão das leituras do medidor, o coeficiente de correlação foi 0,78. Esta variação encontrada para madeira de *Tsuga heterophylla*, é atribuída a vários fatores, como bolsas de umidade, gradientes de umidade, densidade da madeira, dentre outros (KOZLIK, 1971).

FIGURA 9 - RELAÇÃO ENTRE TEOR DE UMIDADE VERDADEIRO E AS LEITURAS DO MEDIDOR TIPO PERDA DE POTÊNCIA



Fonte: KOZLIK (1971).

É esperado que os medidores dielétricos de corrente alternada sejam sensíveis a temperatura, já que tanto ε e como *tan* δ alteram-se com a temperatura. Com base nos estudos de JAMES (1968), que elaborou dados de correção de temperatura para medidores de umidade

radiofrequência típicos, a leitura do medidor é muito alta para temperaturas mais elevadas e muito baixa a temperaturas menores, comparada com a temperatura padrão de 26,7°C. Isto indica que o aumento da temperatura tem o mesmo efeito sobre capacitância de constante dielétrica, como o aumento do teor de umidade. Nesse particular, contudo, as curvas de correção para o medidor perda de potência deveriam ser mais complexas, por causa da interação entre o fator de potência e a constante dielétrica.

A orientação da grã também afeta os medidores de umidade tipo capacitância e perda de potência, porque tanto ε como $tan\ \delta$ são mais altos ao longo da grã que na direção transversal.

Um medidor de umidade manual tipo perda de potência radiofrequência, possui eletrodos de contato superficial não penetrantes, que podem variar em desenho de acordo com o material em que são usados. Existem instrumentos com 8 pontos de mola de contato almofadados, igualmente espaçados na circunferência de um círculo. O campo elétrico desses eletrodos penetra aproximadamente 20 mm, de modo que podem ser lidas espessuras de até 40 mm. Com eletrodos de contato superficial, as primeiras camadas da madeira tem um efeito predominante nas leituras do medidor.

O medidor dielétrico tipo perda de potência, em comparação com o de resistência, permite a obtenção do teor de umidade mais rapidamente, uma vez que não possui eletrodos tipo agulha, cujo cravamento e arrancamento de um grande número de peças toma muito tempo (MACKAY, 1976a). Entretanto, sua utilização para monitoramento contínuo do teor de umidade da madeira durante a secagem em estufa, é pouco conhecida. Uma desvantagem do seu uso, após a secagem em estufa, em madeira que ainda apresenta gradientes de umidade, é que o valor indicado pelo medidor reflete o teor de umidade da superfície da madeira (MACKAY, 1974), que naturalmente é mais baixo que o real. Em razão disso, MACKAY (1976b) recomenda o uso de medidor de umidade tipo perda de potência, apenas para madeiras que tenham sido submetidas a um processo de equalização no final da secagem em estufa.

Os medidores tipo perda de potência radiofrequência podem medir com segurança teores de umidade da madeira dentro da faixa de 0 a 30% (MACKAY, 1976a; SIMPSON, 1991). Alguns fabricantes oferecem aparelhos em que o teor de umidade verdadeiro é lido diretamente no indicador, enquanto que em outros o valor obtido pelo medidor precisa ser comparado com uma tabela separada (SIMPSON, 1991).

2.5. EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM

As condições de secagem na maioria das estufas comerciais, são controladas através de equipamentos automáticos ou semi-automáticos, ao passo que em pequenas instalações, ou em equipamentos de desenho mais simples, algumas vezes é usado o controle manual.

Várias técnicas de controle de processo estão disponíveis para uso em equipamentos de controle semi-automático ou completamente automático. Estas, incluem o controle por zona, que equaliza as temperaturas de bulbo seco em toda a estufa, controle de velocidade com frequência variável para os ventiladores, e medidores de umidade dentro da estufa.

2.5.1. Sistema de controle manual

O controle manual da secagem geralmente é empregado em operações muito pequenas, que usam, muitas vezes, equipamentos projetados em casa, para operações em que uma pessoa monitora a estufa quase em tempo integral.

Para um controle bem sucedido das condições de secagem, as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido precisam ser conhecidas. Se essas temperaturas diferem daquelas desejadas, as válvulas que regulam o fluxo de vapor (aquecimento) e vaporização (umidade relativa do ar) dentro da estufa, precisam ser ajustadas até que as leituras de temperaturas requeridas sejam alcançadas. As janelas de ventilação também precisam ser vigiadas e ajustadas. Para manter a temperatura ou a umidade relativa razoavelmente próximas dos valores desejados, é requerido do operador um tempo considerável, para o controle e a realização de pequenos ajustes nas válvulas.

Os aparelhos comumente usados para medição de temperatura durante o controle manual, são de duas classes: os indicadores e os registradores. Termômetros indicadores de haste de vidro são frequentemente usados. Termômetros indicadores digitais tem substituído largamente o tipo mola de pressão, sendo que o sensor dos mesmos pode ser um termopar ou um RTD.

Termômetros digitais com capacidade para ser acoplado a uma impressora, também são disponíveis quando registros escritos da temperatura são desejados durante um certo período de tempo. Como no caso dos termômetros indicadores, o sensor dos termômetros registradores pode ser um termopar ou um RTD.

A presença constante do operador da estufa é necessária para abrir e fechar os registros de passagem de vapor e as janelas de ventilação, de acordo com o programa de secagem preestabelecido. Um sistema controlado manualmente depende, basicamente, da experiência do operador da estufa (HOLMES & ARGANBRIGHT, 1976). Segundo esses autores, a principal desvantagem do sistema é que o mesmo não pode responder automaticamente às diferenças nas condições iniciais da madeira, ou às variações na taxa de secagem entre as diferentes cargas.

2.5.2. Sistema de controle semi-automático

Os sistemas semi-automáticos registram e controlam as variáveis com base em pontos de ajustes, que são mudados de tempos em tempos durante a operação da estufa, por um operador. Segundo WENGERT & EVANS (1971), o sistema de controle semi-automático permite programar as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido em função do teor de umidade da madeira, medi-las e registra-las, além de obter as condições desejadas na estufa através do controle do calor, vaporização e das janelas de ventilação. KORDES (1980b) acredita que essas instalações de controle convencional ainda estão em uso em aproximadamente 90% das estufas de secagem existentes, e produzem bons resultados.

Esses sistemas caracterizam-se por apresentar um controlador-registrador, que mede e registra em um gráfico as condições prevalecentes na estufa, e controla a temperatura e a umidade relativa, de acordo com as condições pré-ajustadas pelo operador da estufa. A medida que a secagem progride, o operador altera os pontos de ajustes do instrumento para as condições desejadas na estufa. Isto pode ser feito com base no tempo decorrido desde o início da operação, ou no teor de umidade atual da madeira medido por uma técnica de amostragem, como pesagem de tábuas amostras. O primeiro é mais típico de operações de secagem de coníferas, e o último é mais comumente usado em secagem de folhosas. Uma vez ajustadas as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido, o instrumento controla automaticamente as condições até que elas sejam reajustadas.

Sinais indicando as condições atuais da estufa são recebidos no controlador-registrador, a partir dos sensores internos. O equipamento compara as condições variáveis da estufa com o instrumento de pontos de ajuste das condições. Mudanças nas condições da estufa são feitas através de sinais para o sistema de aquecimento, janelas de ventilação acionadas eletricamente, e

sistemas de umidificação, conforme a necessidade de estabelecer na a estufa as condições dos pontos de ajustes.

Durante muitos anos, o controlador-registrador e seu sistema de ventilação funcionaram num modo liga-desliga, ou seja, o controlador acionava as janelas de ventilação para ficar completamente aberta ou completamente fechada. Este método geralmente desperdiça energia, e não apresenta um controle das condições da estufa tão exato quanto desejado. Mais recentemente, o uso de sistemas proporcionais e controladores, tornou-se prática aceita na maioria das operações de estufas. Nesse método, as janelas de ventilação são abertas em graus variáveis, dependendo até onde o ambiente da estufa se desvia das condições ajustadas, apresentando, deste modo, um controle mais preciso e economizando energia.

As unidades sensíveis de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido são conectadas individualmente por longos tubos capilares, aos tubos de Bourdon dentro do controlador-registrador, o qual normalmente está localizado na sala de controle da estufa. Os bulbos e capilares e os tubos de Bourdon, são vedados com um líquido volátil (butano) e seu vapor. O aumento da temperatura da estufa causa um aumento da pressão no sistema líquido-vapor; e o tubo capilar transmite a mudança de pressão dentro do tubo helicoidal ou de Bourdon, fazendo-o expandir-se. Este movimento é transmitido para o braço da pena, o qual se move radialmente no lado externo do gráfico de registro, para indicar o aumento em temperatura. Quando a temperatura na estufa diminui, ocorre o processo inverso.

A função controladora do instrumento é um sistema pneumático, que controla a quantidade de vapor que entra na estufa. Dentro do controlador-registrador, o tubo capilar de cada sistema de bulbo é dividido, sendo que um cabo vai para a função de registro e o outro para um segundo tubo de Bourdon. A medida que a pressão muda dentro do sistema, válvulas de ar tipo agulha são acionadas, controlando, desse modo, precisamente a entrada de calor na estufa, e também a ventilação e vaporização ou umidificação.

2.5.3. Sistema de controle completamente automático

Nos sistemas completamente automáticos, as informações do controle do processo são introduzidas no início da operação de secagem, e qualquer alteração posterior, é feita automaticamente pelo equipamento durante o funcionamento da estufa. Quaisquer mudanças em temperatura ou umidade relativa, são feitas automaticamente pelo controlador durante o

funcionamento da estufa. Estas mudanças podem também incluir determinação do teor de umidade final almejado, e o desligamento da estufa. O cancelamento das mudanças é possível com esses sistemas, mas raramente usados. Este procedimento difere do controle semi-automático, em que o controlador-registrador mantém efetivamente as condições pré-ajustadas mas não muda os pontos de ajustes, os quais precisam ser modificados pelo operador.

Sistemas completamente automáticos, para medir o teor de umidade da madeira, variam desde controladores que operam com monitoramento contínuo, usados há várias décadas em algumas regiões, controladores baseados em células de carga, que pesam a carga ou parte dela, até os controladores computadorizados recentemente introduzidos.

Controladores tipo monitoramento contínuo representam o meio mais fácil de controle automático. Muito usados nos programas temperatura-tempo, eles se baseiam na hipótese que, para uma determinada espécie, espessura e classe de madeira, o teor de umidade da carga, e em conseqüência, as condições na estufa, dependerão do tempo de secagem decorrido. Este equipamento de controle de secagem é constituído de dois discos de metal pré-cortados, um representando a configuração da temperatura do bulbo seco com o tempo, e o outro a temperatura do bulbo úmido com o tempo (MACKAY & OLIVEIRA, 1989). Diferentes discos excêntricos, tem que ser cortados em função da espécie e espessura da madeira.

A partir da metade da década de 80, aproximadamente, foram introduzidos os controles computadorizados, tanto nas operações de coníferas como de folhosas. Uma revisão dos principais estudos realizados nos últimos anos sobre automação do processo de secagem de madeiras, é apresentada por QUARLES & WENGERT (1989). COCHRUN (1981) e KELLER (1983), citados no referido trabalho, discutem o uso potencial de computadores para controle e monitoramento das operações de secagem. MACKAY (1988) revisou os progressos em automação das estufas no oeste do Canadá. Descrições e revisões de sistemas automáticos, também foram relatadas por HOLMES (1988a) e WENGERT (1984), citado por QUARLES & WENGERT (1989). Apesar desses avanços, LITTLE et al. (1986) acreditam que os sistemas de controles usados na maioria das estufas comerciais de secagem de madeira, empregam tecnologia antiquada. Entretanto, KUUN & VERMAAS (1988) consideram que um sistema de controle automático pode ser projetado para monitorar e controlar o funcionamento de novas estufas, ou das estufas de secagem em operação, usando equipamentos de finalidades gerais, como microcomputadores, sensores de temperatura e outros.

Sistemas de controles computadorizados podem variar desde aqueles que são pouco mais que sistemas contínuos de monitoramento baseados no tempo, até aqueles que medem o teor de umidade da madeira em certas faixas, e o deduzem em outras. KUUN & VERMAAS (1988) afirmam, que para uma secagem bem sucedida, os parâmetros básicos a serem controlados são as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, a umidade relativa do ar e a umidade da madeira. Alguns sistemas não apenas monitoram e controlam rigorosamente as condições de temperatura e umidade relativa na estufa, mas também fazem alterações nas velocidades do ventilador (KARAVAEVA et al., 1987), e monitoram ou controlam o consumo de energia.

2.6. PESQUISAS RECENTES SOBRE SISTEMAS ALTERNATIVOS DE CONTROLE

2.6.1. Monitoramento das condições da estufa através de sistema de aquisição de dados

Nos últimos 10 anos, pesquisas e desenvolvimentos sobre sistemas de aquisição de dados controlados por computador, com vistas ao monitoramento do processo de secagem da madeira, tem sido abordados com muita frequência na literatura mundial. O emprego de computadores para medir e controlar as variáveis mais importantes do processo de secagem, foi relatado nos trabalhos de KORDES (1980a, 1980b) e BRUNNER (1981), coincidentemente, na época do surgimento do computador pessoal. Anteriormente, SHEKHTOV (1978) havia discutido o controle lógico do processo de secagem em função da condição real da madeira, e descreveu um sistema automático de controle, em que um computador comanda o processo de secagem com base na entrada de informações sobre temperatura, teor de umidade e gradiente de umidade da madeira.

BRUNNER (1981) acredita que o sucesso de qualquer método de controle de estufas de secagem, depende da precisão de medição do teor de umidade, e aponta que o método mais desenvolvido considera a distribuição da umidade através da seção transversal da tábua. Posteriormente, BRUNNER (1985) estabeleceu contato com os fabricantes de computadores, visando eliminar as dificuldades de controle, comumente observadas nos equipamentos.

A análise da estufa de secagem com referência ao consumo de energia e qualidade da secagem, requer a coleta extensiva de dados. Para alcançar este objetivo, WELLING &

RESSEL (1985) desenvolveram um sistema de aquisição de dados controlado por computador, cuja tarefa é medir todos os valores necessários para realizar cálculos e armazenar dados e resultados em discos magnéticos, para processamentos posteriores. Para melhor informação do usuário, todos os valores medidos e os resultados intermediários são exibidos na tela do monitor. O uso do computador para controlar o ciclo de medição e os aparelhos de medição, torna o processo de secagem bastante flexível.

NEVILLE & VERMAAS (1988) desenharam e construíram uma estufa de laboratório, para secagem de tábuas de *Eucalyptus grandis* de dimensões normais, com programas de baixa temperatura. Ao equipamento, foram adicionados instrumentação auxiliar e técnicas de computação, de modo que todas as variáveis envolvidas no processo pudessem ser controladas através de um software.

KUUN & VERMAAS (1988) acreditam que computador pessoal pode ser uma ferramenta de manejo eficiente, quando usado como gerenciador num sistema de controle, geralmente conectado dentro de uma rede, junto com muitos outros controladores de processo inteligentes. Esses sistemas de controle podem ser empregados com muitas vantagens por uma serraria, que opera uma bateria de estufas de secagem.

Para a captura de dados e fins de controle, VERMAAS & NEVILLE (1988) usaram um microcomputador HP-85 acoplado a uma unidade de aquisição de dados HP-3421A através de uma interface de conexão HP-IL. A necessidade básica do sistema de controle foi a capacidade para adaptar-se rapidamente, ou ao programa baseado no tempo, ou no teor de umidade. As variáveis registradas, de hora em hora, numa fita cassete, foram as seguintes: temperatura de bulbo seco/temperatura de bulbo úmido de entrada, temperatura de bulbo seco de saída da pilha, umidade relativa, temperatura da superfície e do centro da madeira, massa de madeira, perda de massa, e teor de umidade. Para KUUN & VERMAAS (1988), parâmetros de aquisição de dados em tempo real, como temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, fluxo de ar e teor de umidade da madeira, induzem a um controle que pode finalizar a secagem mais rapidamente e com menos defeito da madeira. Concluem, que uma das principais vantagens do sistema computadorizado, é a maior precisão ao manter os pontos de ajustes especificados.

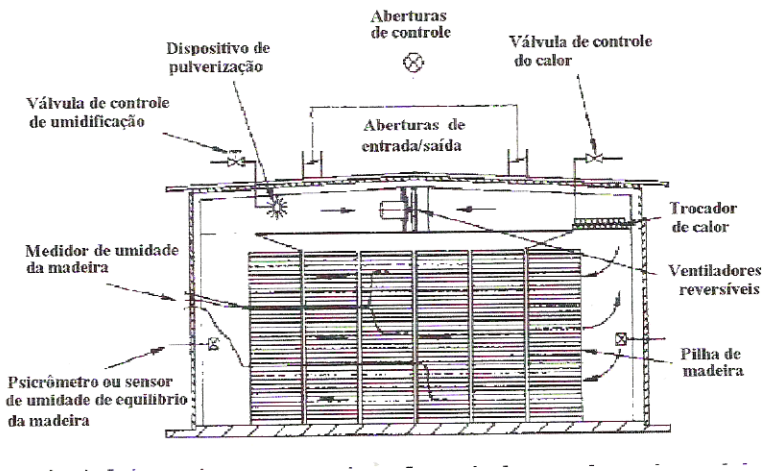
Segundo KUUN & VERMAAS (1989), durante a execução de um programa de pesquisa em secagem a alta temperatura, são coletados, registrados e analisados grande quantidade de dados, o que torna inevitável o uso de um sistema de controle e aquisição de dados computadorizado. As tarefas de tais sistemas, incluem a medição de todos os parâmetros

relevantes, realizando o controle em tempo real da temperatura, umidade relativa, pressão, fluxo de ar dentro da estufa, e armazenando vários parâmetros a alta velocidade, em meios magnéticos. O algoritmo de controle também executa cálculos extensivos de uma quantidade indeterminada de variáveis durante o controle do processo, como as determinações da umidade relativa, umidade de equilíbrio, linearização de vários tipos de termopares, dentre outros.

Pesquisadores da Universidade do Tennessee utilizaram um microcomputador para monitorar e controlar as operações de uma estufa experimental. A estufa foi, originalmente, equipada com um controlador-registrador eletrônico, que utiliza impulsos pneumáticos, para acionar o sistema de aquecimento, de vaporização e os motores que controlam as aberturas de ventilação. Este sistema, usando apenas equipamentos disponíveis comercialmente, proporcionou benefícios, como controle mais preciso das condições da estufa, modificações automáticas no programa de secagem, e monitoramento de doze parâmetros operacionais do sistema (LITTLE et al., 1986).

Os principais componentes a serem considerados quando se planeja automatizar uma estufa, são mostrados pela Figura 10. Em geral, é necessário ao menos medir e controlar as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, monitorando a temperatura dos trocadores de calor, bem como as aberturas de entrada e saída de ar, e os aparelhos de umidificação. Parâmetros adicionais como TDAL, temperaturas superficiais e internas de tábuas individuais, e gradiente de umidade, determinado através de medidor de umidade elétrico, também podem ser monitorados para fins de controle (KUUN & VERMAAS, 1988).

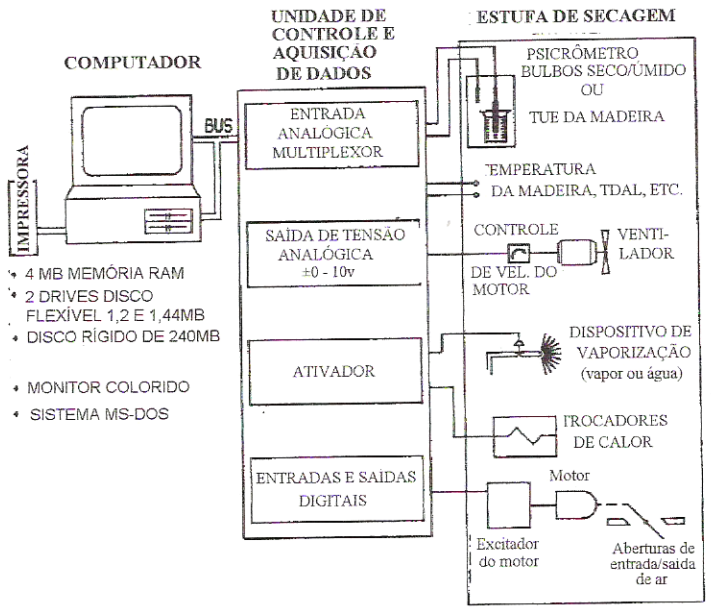
FIGURA 10 - ESTUFA TÍPICA DE SECAGEM DE MADEIRA.



Fonte: KUUN & VERMAAS (1988).

De acordo com KUUN & VERMAAS (1988), um sistema computadorizado típico é composto de três módulos principais: computador pessoal com software associado, unidade de controle e aquisição de dados, e estufa para secagem de madeira, equipada com os dispositivos de controle necessários, conforme ilustra a Figura 11.

FIGURA 11 - DIAGRAMA PARA AUTOMAÇÃO DA ESTUFA DE SECAGEM USANDO COMPUTADOR E EQUIPAMENTO BÁSICO DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS



Fonte: KUUN & VERMAAS (1988).

a) Computador pessoal - a maioria dos microcomputadores compatíveis podem servir como um instrumento controlador, com uma configuração mínima, como mostra a Figura 11. Deve-se notar, contudo, que um sistema de operação multi-tarefa é de vital importância quando são usados certos softwares. Coprocessadores matemáticos também são necessários, porque a maioria dos programas científicos e de engenharia requerem grande precisão. Usando um computador como instrumento controlador, pode-se alcançar um eficiente controle do processo, devido à rápida realimentação do equipamento de aquisição de dados.

b) Unidade de controle e aquisição de dados - várias unidades de controle e aquisição de dados satisfazem as necessidades de automação de uma estufa de secagem. Essas, variam desde

unidades conectadas diretamente à placa-mãe do computador, até sistemas sofisticados, com memórias e unidades centrais de processamento próprios. A sofisticação da aplicação é que define o tipo de equipamento de controle e aquisição de dados a ser utilizado. Mais de um sistema de controle e aquisição de dados pode ser conectado ao mesmo computador, num sistema de rede, formando a base de um processo de controle/sistema de gerenciamento bem distribuído.

c) Estufa de secagem - o desenho da estufa e o leiaute de seus componentes, tais como ventiladores, elementos de aquecimento, aparelhos de borrifação, posição das aberturas, dentre outros, variam de um fabricante para outro. Os princípios básicos de operação, contudo, permanecem similares. Automação de estufas é, desta maneira, essencialmente uma questão de conexão dos transdutores, sensores e acionadores, para o equipamento de controle e aquisição de dados e computador. A Figura 11 possibilita uma visão mais detalhada dos princípios gerais do desenho, e a filosofia seguida por ocasião da automação da estufa. Como mencionado anteriormente, uma variedade de medições adicionais, além das básicas consideradas aqui, podem ser incluídas para aumentar a sofisticação e precisão de controle. Exceto para o teor de umidade normal, ou programas de secagem baseados no tempo, é teoricamente possível para um operador, controlar o processo de secagem a partir de um dos parâmetros, ou uma combinação deles.

2.6.2. Monitoramento do teor de umidade da madeira

Nos últimos anos, muitos estudos tem sido conduzidos na tentativa de desenvolver técnicas de medição do teor de umidade da madeira durante a secagem em estufas comerciais, mais modernas, práticas e versáteis, que aquelas descritas no item 2.4.5. Dentre os mais recentes desenvolvimentos, a variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL) e temperatura da madeira, são as alternativas tecnológicas mais estudadas com vistas a aplicação no controle do processo de secagem da madeira.

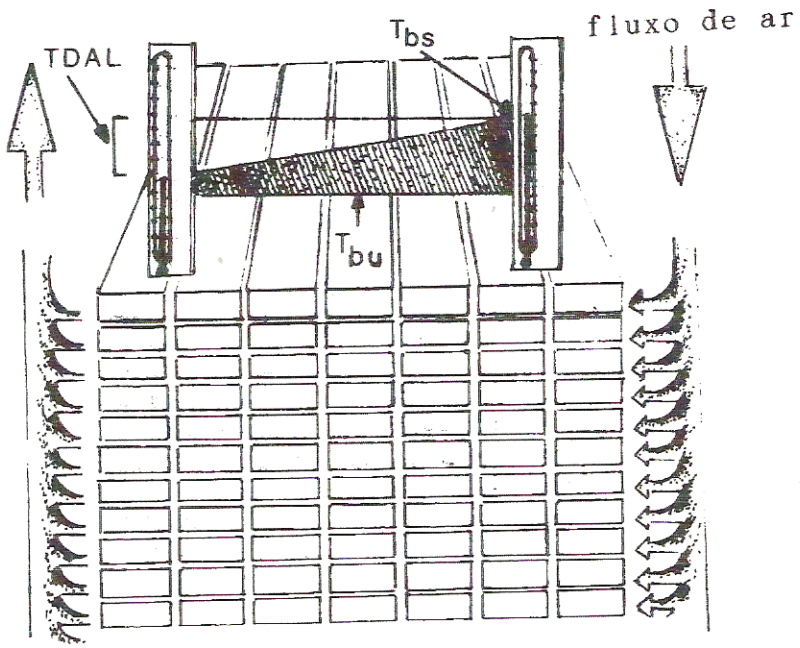
2.6.2.1. Variação da temperatura na da pilha de madeira (TDAL)

Durante a secagem da madeira, o ar aquecido impulsionado pelos ventiladores, ao passar pela pilha sofre uma queda de temperatura. A razão pela qual a temperatura diminui ao

passar pela pilha, é que a madeira úmida absorve a energia necessária para evaporar a água (ZIEGLER, 1988; TAYLOR & LANDOCH, 1990).

A TDAL, ilustrada na Figura 12, é também conhecida como Delta T (ΔT), que se refere a diferença entre a temperatura do ar na entrada e na saída da pilha de madeira (HOLMES, 1988a; VRANIZAN & WOHLGEMUTH, 1988; VERMAAS & NEVILLE, 1988). De acordo com WENGERT (1992), os sensores de temperatura devem estar localizados a não mais de 25 mm nos lados da pilha.

FIGURA 12 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA PILHA DE MADEIRA (TDAL)



Fonte: ZIEGLER (1988).

legenda: T_{bs} = temperatura do bulbo seco
T_{bu} = temperatura do bulbo úmido

Muitos estudos tem investigado a relação entre a TDAL e o teor de umidade da madeira, com o objetivo de criar um sistema de controle automático para a secagem de madeira serrada em estufa. Este sistema tem sido estudado principalmente no processo alta temperatura, embora possa ser aplicado também para secagem a temperaturas convencionais (QUARLES & WENGERT, 1989).

A TDAL ou ΔT varia, dentre outros fatores, com a temperatura de secagem, largura da pilha, velocidade do ar e umidade da madeira. No primeiro célebre trabalho sobre TDAL,

STEVENS & JOHNSTON (1957) examinaram o efeito da velocidade do ar sobre a queda de temperatura e taxa de secagem, numa pilha de madeira úmida dentro da estufa. Descobriram que a taxa de secagem diminui com o decréscimo da TDAL, e que o uso de altas velocidades e fluxo de ar reverso contribuíram para diminuir o ΔT. PRICE & KOCH (1981) mencionam que o fluxo de ar durante a secagem influi na taxa de secagem, e presumivelmente na TDAL. VRANIZAN & WOHLGEMUTH (1988) sugerem o controle da velocidade dos ventiladores em função do ΔT, para economizar energia durante a secagem em estufas convencionais. Recomendam o emprego de um controle automático ou semi-automático, que ajusta continuamente a velocidade dos ventiladores em função do ΔT, numa relação diretamente proporcional.

O uso da TDAL para determinar o teor de umidade médio, tem sido aplicado para secagem a alta temperatura de madeira de conífera. Embora não tenha sido bem investigado para folhosas, STEINHAGEN (1974) não encontrou uma relação estatisticamente significante entre velocidade do ar e taxa de secagem a teores de umidade abaixo de 40% para yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera*), uma folhosa permeável.

A temperatura de secagem também afeta a TDAL. Conforme HERZBERG et al. (1985), os valores são maiores para alta temperatura que para baixa temperatura.

VERMAAS & NEVILLE (1988) não foram bem sucedidos ao relacionar a queda de temperatura com o tempo e o teor de umidade final, por ocasião da secagem de *Eucalyptus grandis* a baixa temperatura. Atribuíram o fato ao processo utilizado, em que a TDAL foi pequena e difícil de medir corretamente, à eventual incompatibilidade e insegurança dos sensores usados inicialmente, ao emprego de apenas um par de sensores, e à pequena largura da pilha de madeira. Apesar disso, os resultados mostraram-se promissores, mesmo para secagem a baixa temperatura.

Para a maioria das madeiras, o ΔT é grande no início, diminuindo a medida que a secagem progride (HOLMES, 1988a). Madeiras de secagem rápida, como os pinus sulinos, podem produzir um ΔT relativamente grande durante a maior parte do período de secagem. A maioria das madeiras, entretanto, apresentam um ΔT moderado no início, mas pequeno e invariável durante os estágios posteriores, quando a umidade movimenta-se mais lentamente (HOLMES, 1988a).

HOLMES (1988a) afirma que quanto maior for o ΔT, maior é a taxa de secagem. Salienta porém, que esta regra não se aplica em todas as situações, uma vez que o ΔT é apenas uma medida de taxa de transferência de calor do ar para a madeira.

HOLMES (1988a) tem dúvidas sobre a aplicabilidade do ΔT no controle contínuo da estufa. Todavia, acredita que os operadores de estufas podem usa-lo como indicador do final da secagem, seja como um certo teor de umidade a ser alcançado, ou a ser atingido e mantido durante um determinado período de tempo. PANOW & NESTER (1985) também são dessa opinião, e recomendam a finalização da secagem quando a TDAL torna-se suficientemente pequena.

TAYLOR & LANDOCH (1990) relatam que o emprego do controle computadorizado em estufas, baseado nos valores da TDAL, está se tornando mais comum. Embora seus estudos tenham confirmado que a TDAL está diretamente relacionada com o teor de umidade da madeira, constataram ser este relacionamento errado. Por esta razão, acreditam que a TDAL não seja um método preciso para determinação do teor de umidade médio, nem para verificar quando o valor médio final foi alcançado.

Os sistemas de controles automáticos usados no Canadá deduzem o teor de umidade da madeira com base na interpretação das condições da estufa, incluindo TDAL, umidade relativa, consumo de energia, aberturas de ventilação, dentre outros, ao contrário daqueles utilizados nos Estados Unidos e Europa, que medem o teor de umidade com sensores tipo resistência elétrica (MACKAY, 1988).

2.6.2.2. Temperatura da madeira

O emprego da temperatura da madeira, como parte de um sistema a ser utilizado para controlar o processo de secagem, não é recente. Trabalhos pioneiros realizados sobre o assunto iniciaram a aproximadamente 40 anos (KEYLWERTH, 1952; KEYLWERTH et al., 1955; KEYLWERTH & NOACK, 1956), e atualmente a relação temperatura da madeira/teor de umidade volta a ser pesquisada, visando o desenvolvimento de um sistema automático de controle para estufas comerciais (BAI & GARRAHAN, 1984; PANOW & NESTER, 1985; HOLMES & FORRER, 1989).

Segundo HOLMES & FORRER (1989), o uso da temperatura da madeira como um indicador do teor de umidade tem sido investigado, porque a temperatura pode ser medida

corretamente, com precisão e a baixo custo, em qualquer faixa de teor de umidade. O sistema eletrônico desenvolvido por FORRER (1984), para monitorar a distribuição da umidade e temperatura da madeira durante a secagem, possivelmente pode ser aplicado tanto na pesquisa como na indústria, e sem os problemas de medição anteriormente constatados por MALMQUIST & MEICHSNER (1964). As dificuldades frequentemente detectadas por ocasião da medição da temperatura propiciaram uma série de estudos, visando o desenvolvimento de uma metodologia mais adequada.

De acordo com KEYLWERTH (1952), a medição da temperatura superficial da madeira foi dificultada porque a transferência de calor é obstruída pelos próprios sensores, impedindo a determinação exata do valor. Para contornar o problema, BEARD et al. (1985) usaram termômetro de radiação, para medir a temperatura superficial da madeira, o qual pode detectar a temperatura de um objeto, sem encostar no mesmo. Já a temperatura interna da madeira pode ser obtida através da introdução, a certas profundidades, de termopares tipo cobre-constantan (BAI & GARRAHAN, 1984; HOLMES, 1988b) ou cromo-alumínio (NEVILLE & VERMAAS, 1988). A colocação dos sensores na madeira e a posição dos mesmos na pilha, também tem sido investigados (HOLMES, 1988b). ANTTI (1992) mediu a temperatura da madeira com um termômetro de fibra ótica. Foram feitos dois furos, de 3 e 5 mm de diâmetro, radialmente, no meio da amostra, para a conexão dos sensores, os quais foram selados na madeira com silicone.

Embora a inserção de termopares na madeira pareça um procedimento simples, técnicas imperfeitas podem resultar em medições errôneas. Como a madeira tem uma condutividade térmica muito mais baixa do que os metais, os fios termopares conduzem calor para o ponto que está sendo medido e, a menos que o fio seja de bitola extremamente fina, a temperatura medida pode ser significativamente diferente naquele ponto. Para este tipo de trabalho, normalmente são usados fios de 0,05 a 0,20 mm de diâmetro. Além disso, para evitar erros devido a queda de voltagem através dos fios, eles devem ser usados em combinação com um potenciômetro, o qual equilibra a voltagem produzida em comparação com uma fração medida de uma voltagem padrão (BRAMHALL, 1974). O mesmo autor considera que o embutimento em espuma de poliuretano, pode ser considerado como um método apropriado para inserir termopares dentro da madeira, para medição de temperatura.

KEYLWERTH (1952) constatou que as temperaturas interna e superficial fornecem valiosas informações para a dedução do teor de umidade médio da madeira. Baseado no fato

que a temperatura interna da madeira é influenciada principalmente pelo seu teor de umidade, TOMASELLI (1977) sugere o uso da mesma como ferramenta para indicar quando a secagem deve ser concluída.

A utilização da temperatura interna para estimar o teor de umidade da madeira, mostrou-se inicialmente viável para a secagem a alta temperatura (KEYLWERTH et al., 1955; PANOW & NESTER, 1984; PANOW & NESTER, 1985). Porém, VERMAAS & NEVILLE (1988), mesmo reconhecendo a necessidade de novas investigações, evidenciaram que o relacionamento entre as duas variáveis, também é encontrado no processo de baixa temperatura.

No caso da secagem a baixa temperatura, a mudança na temperatura interna em função da percentagem de alteração no teor de umidade da madeira, é menor que na secagem a alta temperatura, necessitando o uso de sensores com maior precisão e com proteção adequada contra a condução de calor na madeira.

No trabalho conduzido por VERMAAS & NEVILLE (1988), quando o teor de umidade foi plotado em função da temperatura superficial, os resultados foram semelhantes à relação teor de umidade/temperatura interna, e pode, portanto, ser usada também para fins de controle. Entretanto, a diferença entre as temperaturas do bulbo seco e superficial será mais útil para aplicações no sistema de controle.

A correlação entre o teor de umidade e a diferença entre temperatura do bulbo seco e temperatura interna, resultou em possibilidades definitivas de aplicação no controle da estufa. Com a variação na temperatura do bulbo seco, que normalmente ocorre nas estufas comerciais, a relação entre as diferenças das temperaturas e o teor de umidade, possivelmente será mais útil para fins de controle da estufa, que a relação entre a temperatura absoluta e o teor de umidade.

KOTOK et al. (1969) investigaram os valores das seguintes variáveis independentes, como indicadoras do teor de umidade médio da madeira: temperatura superficial, teor de umidade inicial, massa específica, espessura da madeira e tempo de secagem decorrido. Todas elas contribuíram significativamente para a obtenção de um bom coeficiente de determinação R^2, porém o modelo de regressão múltiplo mais prático, incluiu apenas a temperatura superficial e o tempo de secagem ($R^2 = 0,89$).

VERMAAS & NEVILLE (1988) investigaram vários modelos matemáticos de teor de umidade em função de diferentes variáveis independentes, sendo que alguns deles produziram coeficientes de determinação R^2 de até 0,99.

2.6.3. Outros sistemas de monitoramento

Muitos estudos tem sido conduzidos em escala de laboratório, visando o desenvolvimento de novas tecnologias para o monitoramento do processo de secagem da madeira. Embora alguns tenham fracassado no seu objetivo, outros sugerem a continuidade das investigações, em função dos resultados promissores alcançados.

RASEV & PETROPAVLOVSKIJ (1969) descreveram experimentos de secagem, que relacionam a contração da carga dentro da estufa e o teor de umidade da madeira, e encontraram um erro médio de apenas ± 1,5 - 2,0%. O estudo apresenta o desenho de uma unidade elétrica de controle remoto para medição da contração, e descreve a técnica de calibração das curvas contração/teor de umidade. Essas curvas são influenciadas pela espécie, espessura e teor de umidade inicial da madeira. As curvas podem ser usadas desde que a contração da carga seja medida nos dois lados, num ponto a 1,70 m da base da pilha, e os separadores, com seção transversal de 25 x 40 mm, já tenham sido usados anteriormente. As investigações prosseguiram com a descrição de três sistemas desenvolvidos por diferentes organizações soviéticas (BOGDANOV & ISAKOV, 1972), e com ajustes de curvas contração/teor de umidade, para secagem com circulação forçada em estufas a alta temperatura (BEL'KEVICH, 1975). A partir de então, informações sobre o andamento das pesquisas não são conhecidas.

Um medidor de umidade que mede a resistência através da corrente pulsada, foi desenvolvido por COUTURE & HILL (1974), empregando um pulso de corrente constante, repetitivo, assimétrico, como a medição de forma de onda. Segundo os autores, este sistema elimina ou minimiza os efeitos da maioria dos fenômenos elétricos que podem interferir com a acurada medição do teor de umidade da madeira por resistência. O medidor deve ser usado com sensores de madeira em miniatura, os quais são suficientemente sensíveis às variações do teor de umidade desde 40-50% até 6-7%. O desenvolvimento do medidor de umidade usando o princípio de corrente-pulsada, foi iniciado anteriormente, com os estudos preliminares realizados por HILL & MUNKITTRICK (1970).

NANASSY (1973) constatou que a técnica de comparação por ressonância magnética nuclear (NMR) é adequada para medir corretamente o teor de umidade da madeira. Os valores de teores de umidade encontrados para as espécies yellow-birch (*Betula alleghaniensis*) e white spruce (*Pinus glauca*), tiveram uma precisão de ± 3% em torno dos valores verdadeiros, os

quais são mais precisos que aqueles produzidos por qualquer outro método. A técnica NMR, contudo, apresenta como desvantagens o alto custo do instrumento, medição em amostras de pequeno tamanho, e o tempo de aproximadamente 15 minutos requerido para uma única medição. Segundo o autor, essas desvantagens podem ser superadas.

JAMES et al. (1982) evidenciaram que a velocidade das vibrações ultra-sônicas através de corpos de prova durante a secagem em estufa, estavam bem correlacionadas com o teor de umidade da madeira. Este fato estabelece a possibilidade do uso da velocidade do som para monitoramento do progresso da secagem, no rigoroso ambiente da estufa.

A partir de 1980, muitos artigos foram publicados em periódicos científicos, relacionando as emissões acústicas com o controle do processo de secagem (BECKER, 1982; NOGUCHI et al., 1983; NOGUCHI et al., 1985; HONEYCUTT et al., 1985). Alguns estudos usaram a análise das emissões acústicas, para avaliar a formação de rachaduras durante a secagem de pequenas amostras de madeira (BERNATOWICZ et al., 1991). A energia dos sinais emitidos permite distinguir as macro e micro rachaduras, e aumenta a medida que a velocidade de secagem aumenta. BECKER (1982) relacionou as taxas de emissões com a perda de umidade e diminuição da temperatura, causada pela desorção. Os resultados sugerem que as emissões acústicas poderiam ser úteis no monitoramento de uma amostra durante a secagem. Porém, NOGUCHI et al. (1983) constataram que as taxas de emissões foram mais sensíveis às mudanças da umidade atmosférica que as mudanças em teor de umidade do corpo de prova. Apoiados nesses estudos iniciais, NOGUCHI et al. (1987) usaram os dados das taxas de emissões acústicas e rachaduras da madeira, para desenvolver um controle de monitoramento contínuo para o processo de secagem.

TROUGHTON & CLARKE (1987) desenvolveram um medidor de umidade a infravermelho em série, que proporciona leituras contínuas do teor de umidade de lâminas e madeira serrada verdes, até o limite de 200%. É um método não-destrutivo, baseado no princípio do estímulo infravermelho. O material passa sob uma fonte de calor, e as temperaturas inicial e final são comparadas. O aumento da temperatura é uma função do teor de umidade do material. A técnica e os equipamentos foram patenteados pelos autores no Canadá, em 1985, sob o nº 1.189.192. O método é usado para pré-classificar a madeira com respeito ao seu teor de umidade, antes de coloca-la na estufa de secagem. Quando esses materiais são eficientemente classificados, resulta menos madeira seca em excesso, menos defeitos, e menor desperdício de energia. Além disso, pode-se obter maiores taxas de produção, porque a madeira

com menor teor de umidade tem o tempo de permanência no secador reduzido (TROUGHTON & CLARKE, 1987). A canadense Novax Industries Corporation, comercializa o medidor modelo Novax 8010*. Este método ainda não é utilizado para controlar o teor de umidade dentro da estufa de secagem.

RHEMREV et al. (1991) discutiram o desenvolvimento e uso de um medidor de gradiente de umidade longitudinal, tipo capacitância, para ripas de *Calocedrus decurrens*, destinadas a fabricação de lápis. Com base na curva do gradiente de umidade médio, mostrada num monitor de computador, o operador da estufa decide se continua o processo, começa a equalização, ou retira a carga da estufa. É um método rápido, e não destrutivo, de determinação de gradiente e teor de umidade, e fornece ao operador uma ferramenta adicional para julgamento das tensões de secagem.

DAVIS et al. (1993) descreveram um método não destrutivo de medição da distribuição do teor de umidade na madeira durante a secagem, usando um densitômetro de raio gama de varredura direta. A técnica tem potencial para fornecer informações sobre contração e distribuição de esforços na madeira, particularmente espécies de eucalipto, durante a secagem. Um método similar foi utilizado por SPOLEK & PLUMB (1981), para determinar o teor de umidade de corpos de prova de pinus sulinos.

GARRAHAN et al. (1993) reduziram a velocidade do ventilador, através da instalação de um mecanismo de velocidade ajustável (ASD), para monitorar a taxa de secagem, a distribuição do teor de umidade final e a TDAL. Este procedimento diminuiu o consumo de energia em 50%. A estimativa da TDAL padrão ajuda a determinar se existem pontos, dentro do programa de secagem, onde o fluxo de ar pode ser reduzido.

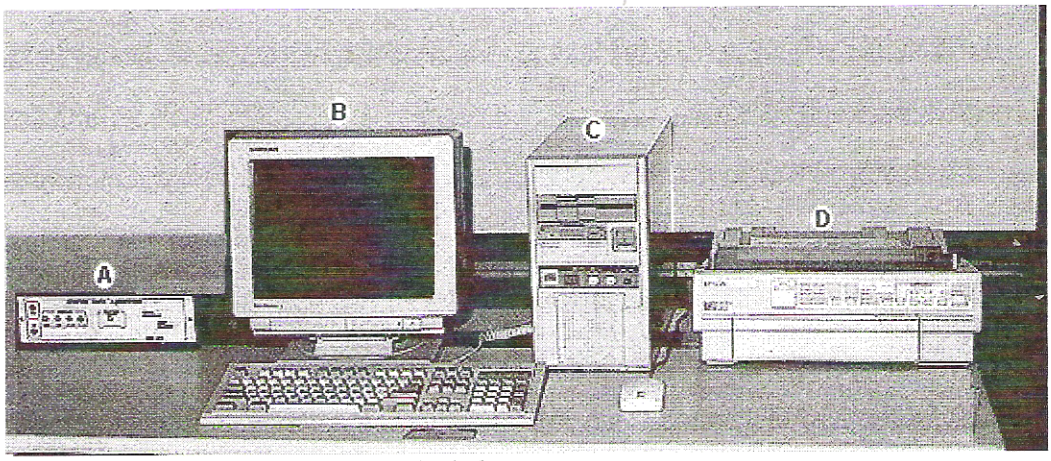
* Os nomes comerciais mencionados neste trabalho são apenas ilustrativos e, portanto, não significam endosso a qualquer fabricante em particular (o autor).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DO PROCESSO DE SECAGEM DA MADEIRA

O gerenciamento do processo de secagem da madeira foi realizado através de um sistema computadorizado, composto de três módulos: microcomputador com um software residente específico, unidade de controle e aquisição de dados e estufa de secagem. Os equipamentos que representam os dois primeiros são mostrados na Figura 13.

FIGURA 13 - SISTEMA COMPUTADORIZADO PARA GERENCIAMENTO DO PROCESSO DE SECAGEM



LEGENDA: A = sistema de aquisição de dados
B = monitor
C = unidade central de processamento
D = impressora

3.1.1. Microcomputador com software residente

O microcomputador utilizado foi um 386 DX, 40 MHz e 4 MB de memória RAM, com disco rígido de 240 MB IDE e monitor colorido SVGA. A unidade central de processamento possui dois drives para disco flexível, sendo um para 5¼" (1,2 MB) e outro para 3½" (1,44 MB). Uma impressora Epson LQ-570, de 80 colunas e 9 pinos, completa o conjunto (Figura 13).

Para gerenciar o sistema, utilizou-se um software elaborado especificamente para este fim, residente no microcomputador. O software é o elemento principal do sistema, tendo entre suas funções o comando do hardware, as leituras de todos os sensores, o processamento e registro dos dados, e execução dos acionamentos com base nas informações coletadas, orientado pelo programa de secagem e pela configuração previamente estabelecida. As fases do programa de secagem, definidas para cada condição de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, foram alteradas gradativamente pelo software de controle, em função do teor de umidade da madeira. Após a configuração do programa e o início do processo, o sistema executou todas as operações com autonomia até a finalização da secagem. Um fluxograma do software de controle utilizado neste estudo, é apresentado na Figura 14.

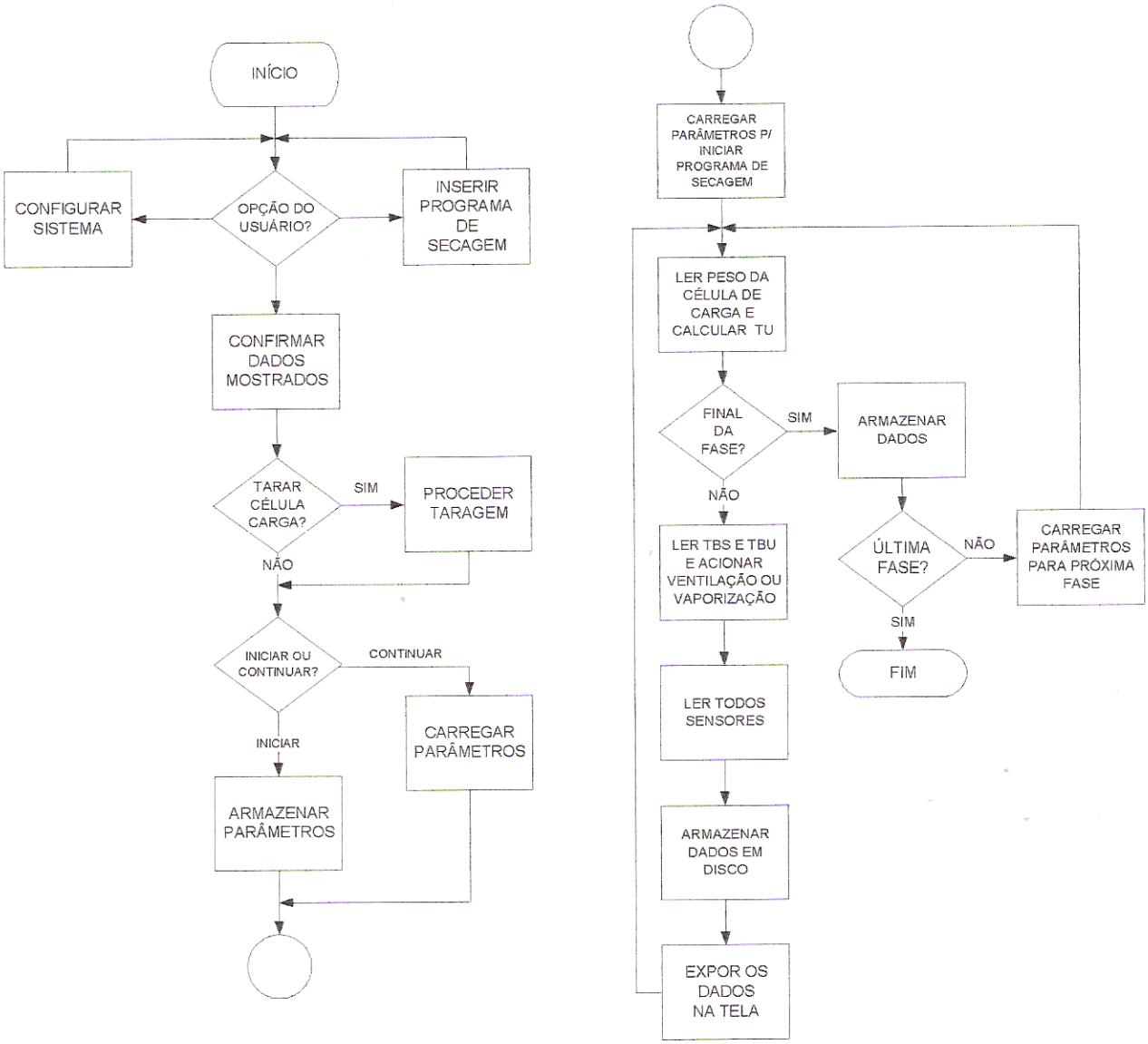
3.1.2. Unidade de controle e aquisição de dados

Para coletar os dados e controlar as condições da estufa durante a secagem da madeira, um sistema de aquisição e controle constituído de 32 canais foi desenvolvido em conjunto, pelos Departamento de Engenharia Elétrica e Engenharia e Tecnologia Rurais, da UFPR (Figura 13). Desses, 18 canais foram destinados para leituras de temperatura, onde se inclui as referentes ao ambiente, as da madeira e de bulbo seco e bulbo úmido; 8 para medições de resistência elétrica da madeira; e 1 para a leitura do peso da pilha de madeira, obtido a partir da célula de carga. Todos os dados coletados foram registrados em arquivos no disco rígido, e permitem a entrada direta e compatível a outros softwares de processamento, tais como planilhas EXCEL® e SUPERCALC®, para análises posteriores.

O sistema controlou também os acionamentos da estufa, como o sistema de vaporização (vapor para controle da umidade relativa do ar), o sistema de ventilação (entrada e saída de ar) e sistema de aquecimento da estufa (trocadores de calor). Esses acionamentos foram executados a partir das leituras dos termômetros de bulbo seco e bulbo úmido, e da célula de carga, com base nos valores preestabelecidos no programa de secagem.

O sistema foi dotado de recursos de proteção contra eventuais falhas, principalmente nos sensores de temperatura do bulbo seco e bulbo úmido, e na célula de carga, para prevenir problemas com referência ao equipamento de secagem.

FIGURA 14 - FLUXOGRAMA DO SOFTWARE DE CONTROLE DO PROCESSO DE SECAGEM



3.1.2.1. Descrição e características técnicas dos elementos de coleta de dados

a) Célula de carga: Um transdutor do tipo "strain-gauge" dotado de dois conectores onde deve ser ligada a alimentação, com dois conectores de saída que fornecem um potencial proporcional à deformação da célula.

- A célula de carga utilizada como sensor, apresenta as seguintes características:
  - célula de carga em forma de "s", para tração ou compressão
  - "strain-gauge" ligados em ponte de Wheatstone

- capacidade: 500 kgf
- sensibilidade: 3mV/V

- Faixa de operação: 0 a 450 kgf
- Erro máximo: ± 0,7 kgf
- Resolução: 0,1 kgf
- Uso fixo para medição de peso da estrutura do sistema
- Recurso: sistema de taragem

b) Sensores de temperatura: Um diodo comum como sensor de temperatura, componente que oferece características adequadas de precisão e linearidade na faixa de operação proposta, de baixo custo e disponível no mercado. A temperatura é obtida de forma indireta, pela medição da tensão sob os terminais do diodo sensor, cujo valor está relacionado à sua temperatura, numa razão de -0,025 volts/°C. Para essa utilização, é necessário aplicar uma corrente elétrica de aproximadamente 1mA, e fazer um condicionamento posterior do sinal fornecido.

Características:

- Sensor utilizado: diodo semicondutor 1N4148
- Faixa de operação: 0 a 125°C
- Erro máximo absoluto: ± 0,4°C
- Resolução: 0,05°C
- Locais de uso: ambientes líquidos e gasosos, desde que não sofram grandes esforços mecânicos

c) Sensores de resistência elétrica: Pares de eletrodos metálicos cravados na face da largura da peça de madeira, permitem obter a resistência elétrica. O condicionamento de sinais converte a resistência da madeira (Ω) em tensão (volts), através da aplicação de uma tensão de -90V entre os eletrodos e medindo-se o valor da corrente que circula entre eles. Basicamente, a corrente é convertida em tensão utilizando-se um amplificador operacional na configuração amplificador/inversor.

Como a faixa de leitura de resistência DC é bastante ampla, podendo variar, em função da espécie, temperatura, teor de umidade e outros fatores, desde alguns ohm até 100 GΩ (FORRER & VERMAAS, 1987), a mesma foi dividida em duas. A primeira, para baixa

resistência, foi delimitada entre 30 kΩ e 10 MΩ, e a segunda, para alta resistência, entre 10 MΩ e 10 GΩ.

Características:

- Sensores: eletrodos metálicos de 35 x 4 mm de comprimento e diâmetro, respectivamente;
- Material: liga metálica de cobre;
- Faixa de operação: 400 kΩ a 10 GΩ;
- Erro máximo absoluto: ± 6%;
- Resolução em ponto flutuante: 0,05

d) Elemento de aquecimento: O sistema de aquecimento da estufa é composto de três resistências blindadas, ligadas em triângulo, totalizando 9 kVA de potência (46000 BTU/h). O acionamento deste elemento é realizado através de um relé magnético (contactor).

e) Elemento de vaporização: O sistema de produção de vapor da estufa é composto por um recipiente metálico que contém água e resistências de aquecimento, as quais são acionadas por um contactor quando o ambiente de secagem requer a injeção de vapor.

f) Elemento de ventilação: O sistema de ventilação é constituído de duas janelas dotadas de relé para abertura e fechamento, sendo uma para entrada de ar externo e outra para saída de ar do interior da estufa. O sistema é comandado pelo módulo de acionamentos.

g) Elemento de circulação de ar: O sistema de circulação de ar é composto por um motor elétrico trifásico de 2 HP que movimenta um ventilador, propiciando a circulação através da pilha de madeira. O motor é acionado através de um contactor, cujo controle é realizado através do módulo de acionamentos.

3.1.3. Estufa de secagem da madeira

O tipo e o grau de automação do equipamento usado na secagem de madeira serrada de *Pinus elliottii*, foram distintos nos testes realizados em escala de laboratório e semi-industrial. Nos testes preliminares conduzidos em estufa de convecção natural, foram monitorados apenas a temperatura do bulbo seco, a temperatura da madeira e a sua resistência

elétrica. Por outro lado, no experimento principal incluiu-se, além das variáveis mencionadas, medições adicionais de temperatura do bulbo úmido e da célula de carga, que permitiram, respectivamente, o controle da umidade relativa do ar e do teor de umidade da carga de madeira.

3.2. TESTES PRELIMINARES

Com o objetivo de correlacionar a resistência elétrica da madeira e a temperatura interna da madeira com o seu teor de umidade, e de estabelecer comparações com a fase experimental conduzida em estufa piloto, foram realizados, previamente, alguns testes de secagem em estufas de laboratório, para as temperaturas de 50, 70, 90 e 110°C.

3.2.1. Material utilizado e preparação das amostras

Tábuas recém serradas de *Pinus elliottii* com dimensões de 2,5 x 12,5 x 200 cm de espessura, largura e comprimento, respectivamente, foram coletadas junto a uma serraria de Curitiba e transportadas para o Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal do Paraná, onde o material foi identificado macroscopicamente.

A partir dessas tábuas, confeccionou-se quatro amostras de igual seção transversal e aproximadamente 50 cm de comprimento, as quais foram pesadas para obtenção do peso inicial (Pu). De cada extremidade das amostras retirou-se um corpo de prova de aproximadamente 2,5 cm de largura, os quais foram utilizados para determinação do teor de umidade inicial (TUi) das mesmas, de acordo como os procedimentos recomendados por RASMUSSEN (1961), SIMPSON (1991) e MACKAY & OLIVEIRA (1989).

3.2.2. Equipamento de secagem

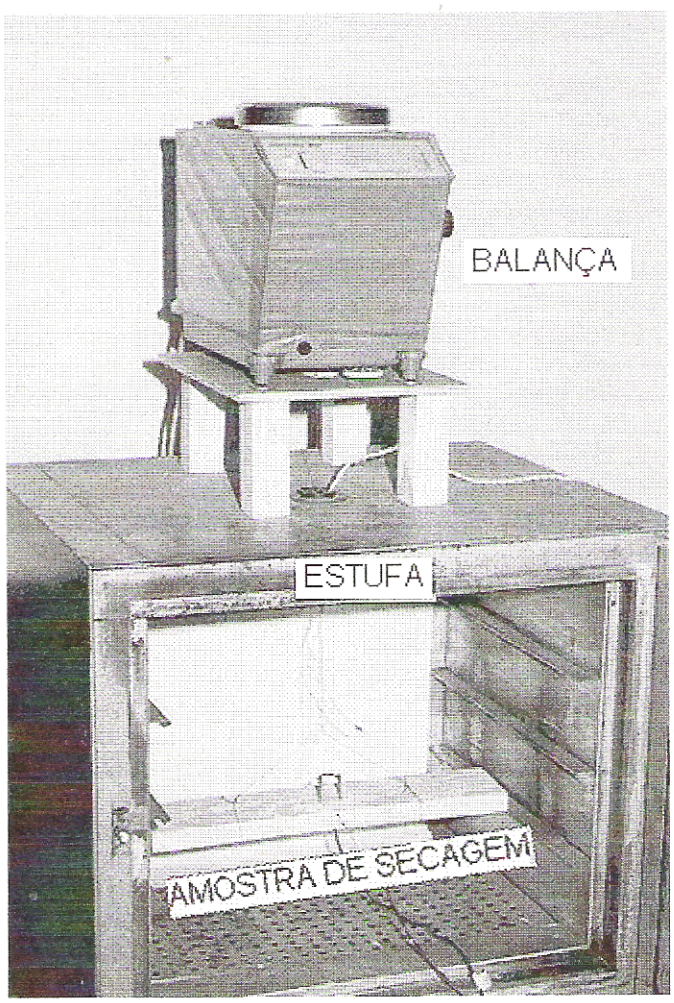
As amostras foram submetidas à secagem em duas estufas de laboratório tipo convecção natural, e com controle termostático da temperatura, ambas dotadas de orifícios superiores, por onde comumente são introduzidos termômetros, como mostrado na Figura 15. Através desses orifícios, introduziu-se os cabos dos sensores para a medição da temperatura e da resistência elétrica da madeira, nas quatro temperaturas de secagem utilizadas.

3.2.3. Medição das variáveis

O controle do teor de umidade das amostras foi realizado através do método gravimétrico. Para tanto, uma balança mecânica com precisão de 0,1g foi colocada sobre cada uma das estufas.

Para possibilitar a pesagem periódica sem a abertura da estufa, um fio de metal preso no dispositivo de engate existente sob a balança e, passando através do orifício do termômetro, manteve a amostra de madeira suspensa dentro da estufa durante todo o período de secagem, como mostra a Figura 15.

FIGURA 15 - EQUIPAMENTO DE SECAGEM E TÉCNICAS DE MEDIÇÕES USADAS NOS TESTES PRELIMINARES.



Obteve-se o teor de umidade da amostra, através da seguinte equação:

$$TU_{amostra} = \frac{Pa(TUi + 100)}{Pu} - 100 \qquad \text{Equação 39}$$

onde,

$TU_{amostra}$ = teor de umidade da amostra de madeira, %

TUi = teor de umidade inicial da amostra de madeira, %

Pa = peso atual da amostra de madeira, g

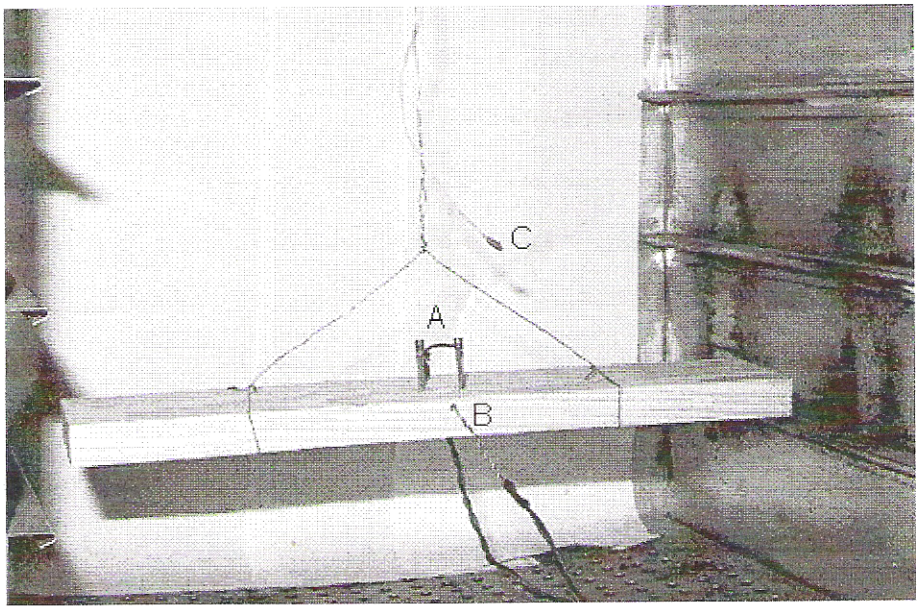
Pu = peso úmido ou inicial da amostra de madeira, g

As informações referentes a essas variáveis foram coletadas através do sistema de aquisição de dados descrito no item 3.1.2., que também tem a função de manter a temperatura do bulbo seco dentro dos níveis requeridos em cada temperatura de secagem.

Durante a operação de secagem, o software de controle da estufa efetuou o monitoramento da temperatura da estufa, resistência elétrica da madeira e sua temperatura interna. Cabos resistentes à temperaturas elevadas, contendo os sensores, foram introduzidos na estufa para coletar as informações desejadas.

Um par de eletrodos isolados, com afastamento de 25 mm entre si e cravados na madeira a uma profundidade de aproximadamente 1/3 da sua espessura, possibilitou a medição da resistência elétrica, em ohms. Próximo ao meio da amostra, a aproximadamente ¼ da sua espessura, perfurações de 25 mm de profundidade, confeccionadas com brocas de 4 mm de diâmetro, permitiram a introdução de sensores para a medição da temperatura interna da madeira. Um sensor colocado próximo à amostra de madeira registrou a temperatura ambiente da estufa.(Figura 16).

FIGURA 16 - POSICIONAMENTO DOS SENSORES PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA (A), TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA (B) E TEMPERATURA DA ESTUFA (C) DURANTE OS TESTES PRELIMINARES



3.3. EXPERIMENTO PRINCIPAL

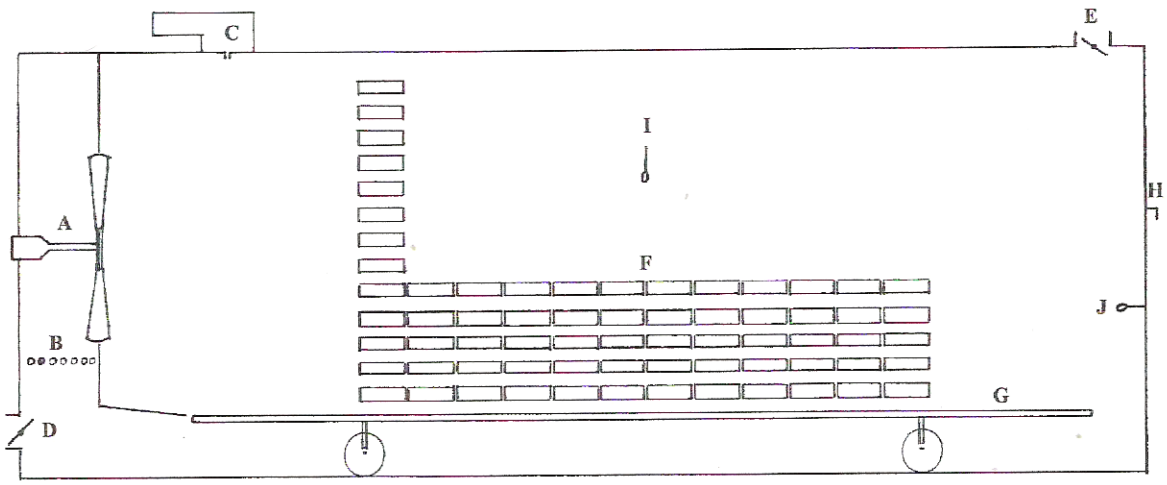
O experimento principal, conduzido na estufa piloto, difere dos testes preliminares, basicamente porque empregou um programa de secagem pré-elaborado, conduzido sob condições completamente controladas. Para cada uma das temperaturas de 50, 70, 90 e 110°C, duas cargas de madeira foram submetidas a secagem, sendo uma para a velocidade de ar de 2,3 m/s e outra para 5,0 m/s.

3.3.1. Estufa piloto

O processamento de secagem da madeira foi realizado numa estufa piloto com dimensões úteis de 0,8 x 1,0 x 4,0 m, e capacidade para aproximadamente 1,0 m³ de madeira serrada, aquecida por trocador de calor e dotada de circulação forçada de ar, conforme ilustrado na Figura 17. O controle das condições de secagem e da estufa, realizado através dos componentes e dispositivos apresentados na Figura 17, foi executado pelo software

previamente mencionado. A umidade relativa da estufa foi controlada através do vapor produzido por uma caldeira elétrica e das aberturas de ventilação. A velocidade do ar através da pilha foi proporcionada por um ventilador axial que produz um volume de ar de 1,0 m³/s. Termômetros de bulbo seco e bulbo úmido permitiram a obtenção da temperatura e umidade relativa da estufa. O teor de umidade da madeira foi obtido através do método de pesagem da carga, utilizando-se uma célula de carga tipo tração.

FIGURA 17 - ESTUFA PILOTO USADA NO EXPERIMENTO PRINCIPAL.



LEGENDA:

A - ventilador
B - trocador de calor
C - caldeira elétrica
D - entrada de ar
E - saída de ar
F - pilha de madeira
G - carrinho
H - porta de carga/descarga
I - termômetro de bulbo seco
J - termômetro de bulbo úmido

3.3.2. Coleta e preparo do material

3.3.2.1. Local de coleta

O material foi coletado numa fazenda da empresa Forex S.A., localizada no município de Canoinhas - SC, 160 km distante de Curitiba. Árvores de *Pinus elliottii* Engelm. com 26 anos e diâmetro a altura do peito entre 25 e 30 cm foram abatidas; em seguida foram secionadas as duas primeiras toras com 2,30 m cada uma. Na serraria da empresa, as toras foram desdobradas em tábuas de igual comprimento, com 2,5 cm de espessura e largura entre 10 e 15 cm. Posteriormente, um volume de aproximadamente 2,0 m³ de madeira serrada foi

transportada para o Laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Engenharia e Tecnologias Rurais do Setor de Ciências Agrárias da UFPR.

O material botânico que identifica a espécie em questão, encontra-se armazenado em exsicata no Laboratório de Dendrologia do Departamento de Silvicultura e Manejo do mesmo Setor (Herbário da Engenharia Florestal), e registrado sob o número 4527.

3.3.2.2. Confecção das amostras e determinação da umidade da madeira

De cada tábua de 2,30 m de comprimento, confeccionou-se três peças de 0,75 m, que constituem as amostras de secagem, as quais foram devidamente codificadas.

Dos extremos de cada amostra de secagem, retirou-se seções com 2,5 cm de largura, para a determinação do teor de umidade inicial (TUi) da madeira, como monstra a Figura 18. A média aritmética entre o teor de umidade de duas seções retiradas dos extremos de cada amostra, foi considerado como sendo o TUi da mesma.

Logo após sua confecção, as amostras de secagem foram pesadas em balança mecânica com capacidade para 6000g e precisão de 0,5g, para obtenção peso úmido ou inicial (Pu). A somatória dos Pu de cada amostra, foi utilizada para representar o Pu da carga de madeira. A média de teor de umidade entre as peças da pilha foi considerado como sendo o TUi da carga de madeira. Essas duas variáveis, Pu e TUi, são indispensáveis para o cálculo do TU da carga de madeira durante a secagem em estufa.

3.3.2.3. Empilhamento da madeira

A madeira foi empilhada sobre um carrinho transportador, separada por sarrafos de 2,5 x 2,5 cm. As tábuas foram colocadas transversalmente sobre o carrinho, de forma a permitir a passagem do ar entre os espaços deixados pelos sarrafos. A largura da pilha foi de 1,50m , e a altura composta por 5 fileiras de tábuas, que corresponde a 50 cm. Para completar a altura da pilha, colocou-se sobre a mesma uma fileira de tábuas secas, com dimensões iguais àquelas componentes da pilha, constituída de uma peça de largura e 5 de altura, separadas por sarrafos de 2,5 x 2,5 cm ("boneco"). O procedimento adotado para confecção da pilha de madeira é apresentado na Figura 19.

FIGURA 18 - METODOLOGIA DE CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS DE SECAGEM E SEÇÕES DE UMIDADE

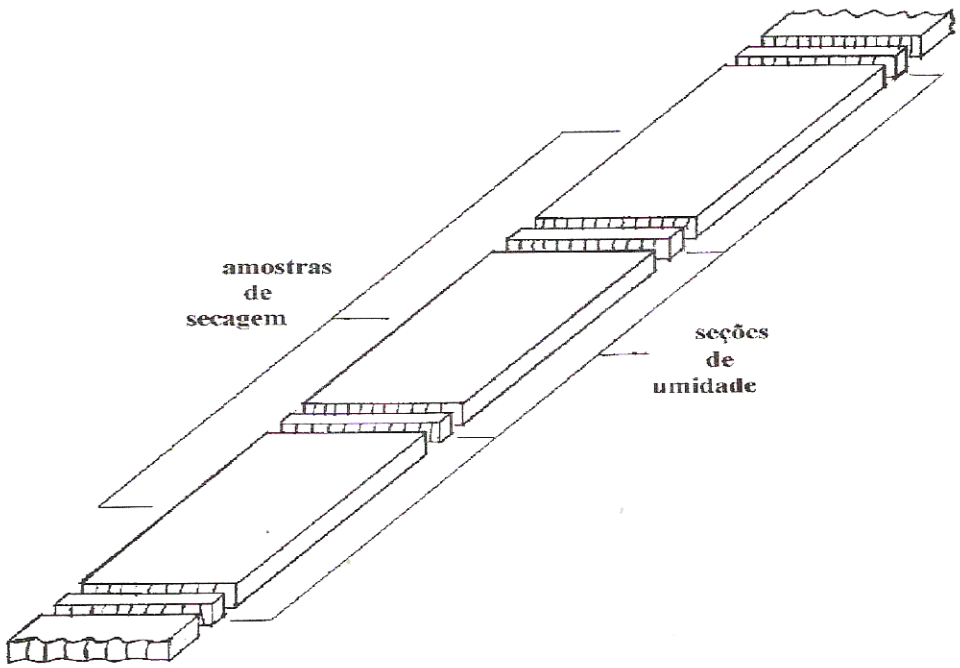
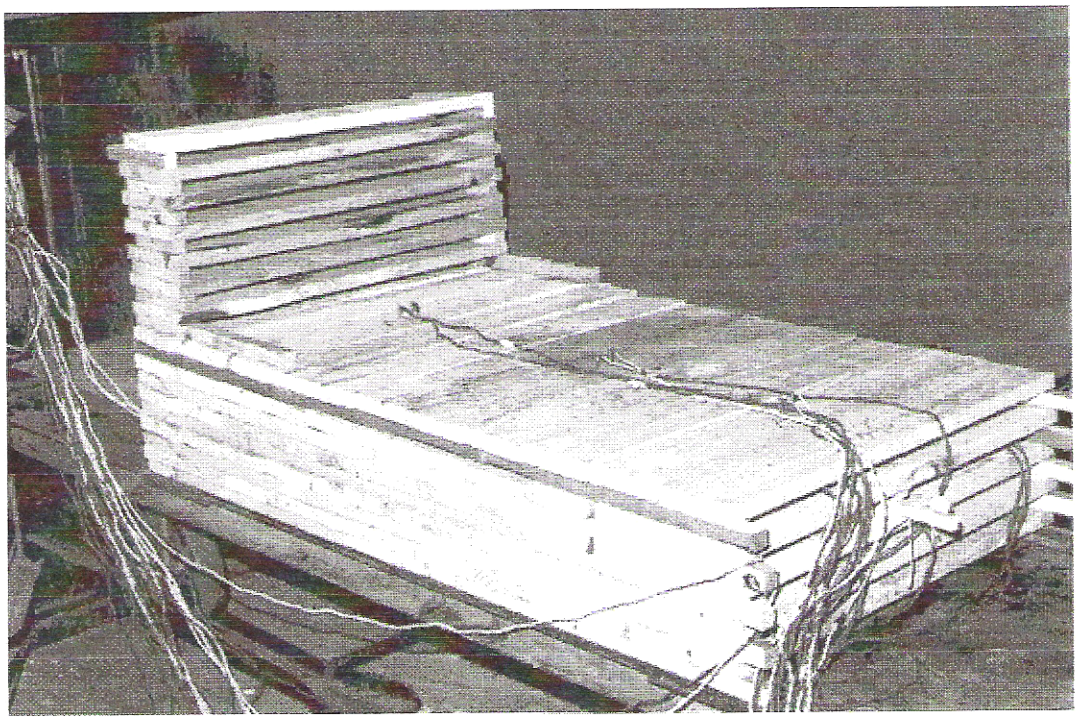


FIGURA 19 - EMPILHAMENTO DA MADEIRA



3.3.3. Métodos de secagem da madeira

Por ocasião do planejamento da pesquisa, foram definidos três métodos de secagem: um de baixa temperatura (50°C), dois de temperatura convencional (70° e 90°C) e um de alta temperatura (110°C). Esses métodos foram escolhidos por serem os mais comumente utilizados pela indústria madeireira, para secagem de madeira de *Pinus* sp. de 2,5 a 5,0 cm de espessura. Além disso, a diferença de 20°C entre um e outro é suficiente para permitir a análise estatísticas dos dados, das variáveis envolvidas no estudo.

3.3.3.1. Programas de secagem utilizados

Para cada um dos métodos, elaborou-se um programa de secagem específico, os quais são apresentados nas Tabelas 1, 2, 3 e 4.

TABELA 1 - PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADO PARA A TEMPERATURA DE 50°C.*

TU	TBS	TBU	TBS-TBU	UR	UE	Ps
- % -	- °C -	- °C -	- °C -	- %	- % -	-
> 70	50	47	3	84	15,8	4,4
70 - 50	50	46	4	79	14,0	4,2
50 - 40	50	43	7	65	10,5	4,3
40 - 30	50	40	10	53	8,3	4,2
30 - 20	50	35	15	38	6,2	4,0
20 - 15	50	30	20	24	4,4	4,0
15 - 10	50	28	22	19	3,8	3,3

onde: TU = teor de umidade da madeira; TBS = temperatura do bulbo seco; TBU = temperatura do bulbo úmido; TBS-TBU = diferença higrométrica; UR = umidade relativa do ar; UE = umidade de equilíbrio da madeira; Ps = potencial de secagem.

* Programa de secagem elaborados com base nas tabelas de umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio da madeira apresentadas por GALVÃO & JANKOWSKY (1985).

TABELA 2 - PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADO PARA A TEMPERATURA DE 70°C.*

TU	TBS	TBU	TBS-TBU	UR	UE	Ps
- % -	- °C -	- °C -	- °C -	- % -	- % -	-
> 70	70	67,0	3,0	86	14,8	4,7
70 - 50	70	66,5	3,5	83	13,6	4,4
50 - 40	70	64,0	6,0	75	11,2	4,0
40 - 30	70	60,0	10,0	62	8,5	4,1
30 - 20	70	54,0	16,0	45	6,1	4,1
20 - 15	70	48,0	22,0	31	4,5	3,9
15 -10	70	42,0	28,0	20	3,3	3,8

TABELA 3 - PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADO PARA A TEMPERATURA DE 90°C.*

TU	TBS	TBU	TBS-TBU	UR	UE	Ps
- % -	- °C-	- °C -	- °C -	- % -	- % -	-
> 70	90	87,5	2,5	90	14,5	4,8
70 - 50	90	87,0	3,0	88	13,6	4,4
50 - 40	90	85,0	5,0	81	11,2	4,0
40 - 30	90	81,0	9,0	69	8,3	4,2
30 - 20	90	75,0	15,0	53	6,0	4,2
20 - 15	90	68,0	22,0	38	4,4	4,0
15 - 10	90	60,0	30,0	26	3,2	3,9

* Programas de secagem elaborados com base nas tabelas de umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio da madeira apresentadas por GALVÃO & JANKOWSKY (1985).

TABELA 4 - PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADO PARA A TEMPERATURA DE 110°C.**

TU - % -	TBS - °C -	TBU - °C -	TBS-TBU - °C -	UR - % -	UE - % -	Ps -
> 70	110	99,4	10,6	69,3	7,0	10,0
70 - 50	110	97,7	12,3	65,2	6,3	9,5
50 - 40	110	94,4	15,6	57,6	5,4	8,3
40 - 30	110	87,8	22,2	44,5	4,0	8,7
30 - 20	110	82,2	27,8	35,4	3,3	7,6
20 - 15	110	76,7	33,3	27,8	2,6	6,7
15 - 10	110	71,1	38,9	21,5	2,1	6,0

onde: TU = teor de umidade da madeira; TBS = temperatura do bulbo seco; TBU = temperatura do bulbo úmido; TBS-TBU = diferença higrométrica; UR = umidade relativa do ar; UE = umidade de equilíbrio da madeira; Ps = potencial de secagem.

** Programa de secagem elaborado com base nos dados de umidade de equilíbrio, calculados por SIMPSON & ROSEN (1981), para altas temperaturas.

3.3.3.2. Velocidade de circulação do ar

Como o motor do ventilador da estufa não dispõe de um dispositivo que permita modificar a velocidade de circulação do ar, o controle é realizado através da relação entre o volume de ar produzido (1,0 m^3/s) e a área de passagem através da pilha de madeira. Dessas duas variáveis, a segunda é a única que possibilita variar a velocidade do ar.

Duas velocidades de ar foram utilizadas para cada temperatura de secagem. Para conseguir esses valores diferenciados, colocou-se uma chapa metálica na parte da frente da pilha de madeira, fixada no teto da estufa, de modo a diminuir a área de passagem de ar. Com o procedimento repetido, obteve-se as áreas de 0,20 (com a chapa) e 0,43 m^2 (sem a chapa), resultando as velocidades de 5,0 e 2,3 m/s, respectivamente. Esses valores foram confirmados através de um anemômetro portátil digital, medindo-se a velocidade no lado de saída do ar na pilha de madeira, nos espaços conferidos pelos sarrafos separadores.

3.3.4. Métodos de monitoramento do teor de umidade da madeira

3.3.4.1. Pesagem da carga de madeira

O teor de umidade da madeira foi monitorado pela pesagem da carga e, devido sua semelhança com o método gravimétrico, foi considerado como padrão para estabelecer comparações com os demais. Para confeccionar o sistema de medição, utilizou-se uma armação de ferro com quatro pontos de apoio, dotada de um eixo cilíndrico (balancin) de 20 mm de diâmetro, conectado superiormente a um macaco manual (Figura 20).

Entre a extremidade superior do balancin e o macaco, fixou-se uma célula de carga do tipo tração, com capacidade para 500 kg. Um módulo condicionador amplificou e ajustou a referência do sinal da célula de carga antes de enviá-lo para o sistema de aquisição de dados. Um desenho esquemático do conjunto é apresentado na Figura 20.

Antes de cada operação de secagem e do carregamento do carrinho, procedeu-se a taragem do equipamento, descontando-se o peso do mesmo e de todos os acessórios utilizados na confecção da pilha, de modo a registrar apenas o peso da madeira durante o processo. Previamente, a célula de carga foi aferida por um técnico da empresa fornecedora do equipamento, e depois de instalada introduziram-se fatores de correção.

Com o valores dos pesos inicial e atual coletados pela célula de carga, e do TUi da madeira, o software residente no microcomputador registrou periodicamente o teor de umidade atual da madeira, calculado através da Equação 39 (página 90).

3.3.4.2. Medidores elétricos

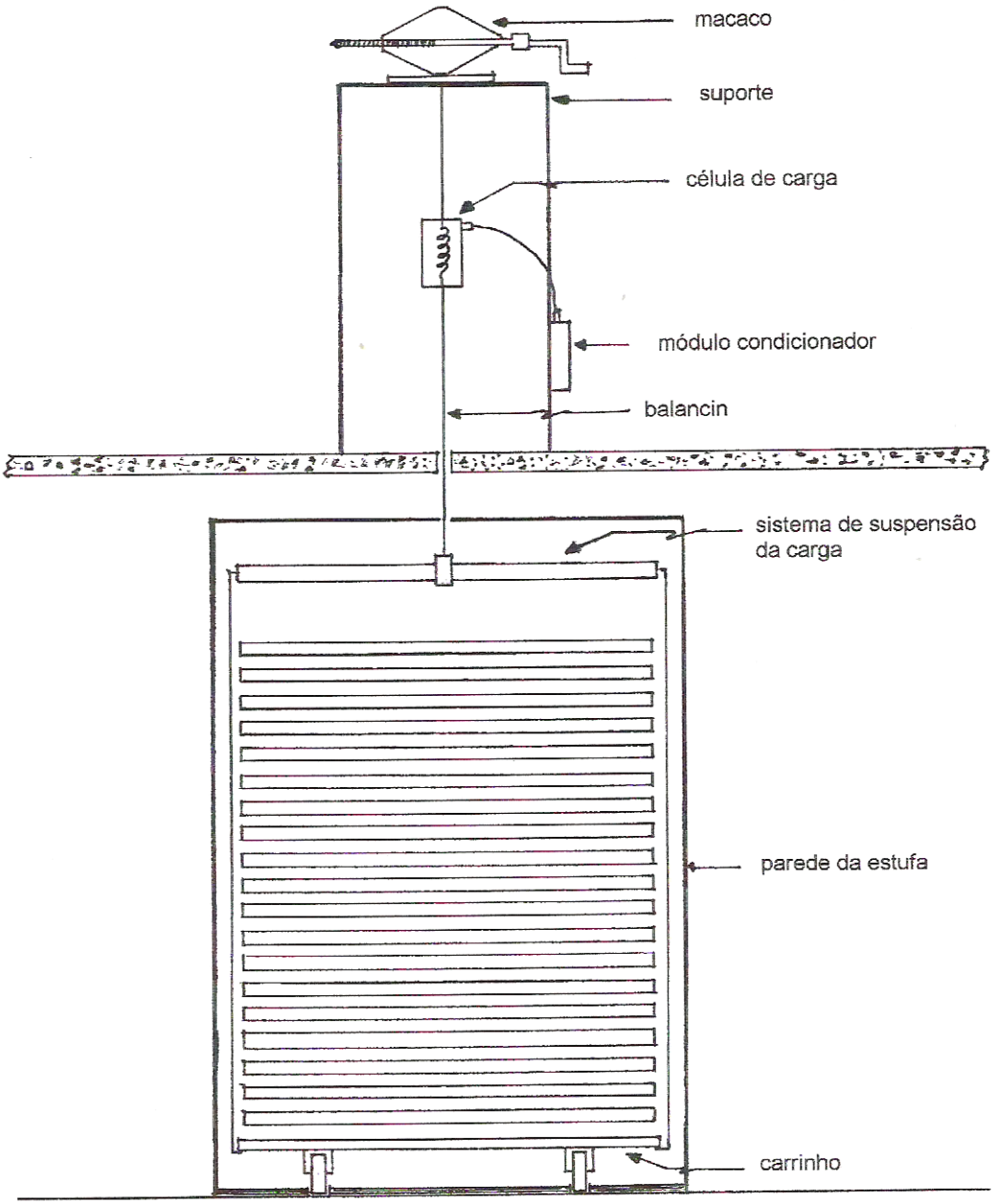
O sistema de medição do teor de umidade por resistência elétrica foi confeccionado utilizando-se como eletrodos dois pinos isolados, de 35 mm de comprimento e 4 mm de diâmetro, para cada ponto de observação. Apenas a ponta de cada pino, correspondente aos primeiros 10 mm, ficaram sem isolamento, e exatamente nesse local o sinal de passagem de corrente entre eles foi coletado.

Em cada ponto de medição, localizado na metade da largura da peça, dois eletrodos cilíndricos com um afastamento de 25 mm entre si, foram cravados na madeira até uma

profundidade correspondente a aproximadamente 1/3 de sua espessura, com o campo elétrico paralelo a direção da grã.

Os valores de resistência elétrica, coletados pelo sistema de aquisição de dados, juntamente com a temperatura da madeira, foram utilizados para ajustar modelos estimadores do teor de umidade da madeira, tanto nos testes preliminares como no experimento principal.

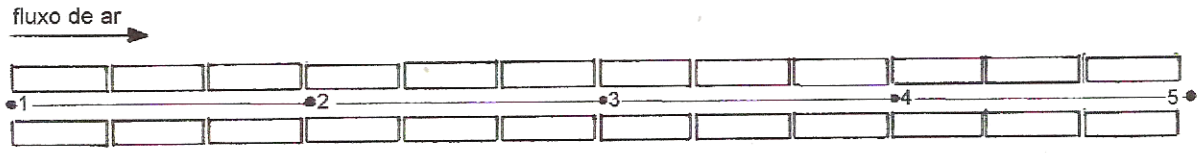
FIGURA 20 - APARATO UTILIZADO PARA PESAGEM DA CARGA DE MADEIRA



3.3.4.3. Variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL)

Para avaliar a queda da temperatura através da pilha, procedeu-se a leitura da temperatura do ar ao longo de sua largura, numa extensão de 1,50 m. Cinco sensores foram distribuídos dentro de um espaço de passagem de ar, entre duas camadas de tábuas, com afastamento entre si de aproximadamente 38 cm, sendo posicionados um na entrada e outro na saída de ar. Os sensores foram fixados em uma vareta fina, introduzida no numa posição central, entre a segunda e a terceira camada de tábuas (Figura 21).

FIGURA 21 - DISPOSIÇÃO DOS CINCO SENSORES UTILIZADOS PARA MONITORAR A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NA PILHA DE MADEIRA



3.3.4.4. Temperatura da madeira

A amostra de madeira utilizada para a coleta da temperatura foi posicionada na primeira fileira, no lado da entrada de ar e na altura da terceira camada de tábuas. As leituras de temperatura foram obtidas aproximadamente no centro da amostra, num ponto correspondente a ¼ da espessura e a uma profundidade de aproximadamente de 25 mm, no sentido da largura da peça. Para medi-la, introduziu-se os sensores em perfurações produzidas por brocas de 4 mm de diâmetro, na face correspondente a espessura. A fixação dos sensores, bem como a vedação dos furos, foi efetivada com pasta de silicone.

Na mesma região onde colocou-se os sensores de temperatura, porém na metade da largura da peça, foram cravados os eletrodos para medir a resistência elétrica da madeira. A proximidade das duas medidas teve como objetivo minimizar possíveis fontes de erro por ocasião do correlacionamento entre seus valores e o teor de umidade da madeira.

3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Nos testes preliminares, conduzidos em estufa de convecção natural, estabeleceu-se correlações entre o teor de umidade, resistência elétrica, e temperatura interna da madeira. A partir dos dados coletados pelo sistema de aquisição, procederam-se a análises da correlação entre as variáveis medidas. De acordo com informações de literatura, os valores de resistência elétrica foram linearizados pela transformação logarítmica.

Com o emprego dos maiores valores de correlação obtidos para as variáveis (matriz de correlação), procederam-se as análises de regressão simples e múltiplas, visando a geração e adequação de modelos estimadores para os valores das variáveis observados. Nas regressões lineares simples, relacionou-se o teor de umidade (TU) com a temperatura da madeira (Tm) e o teor de umidade com o logaritmo da resistência elétrica (LnR). Nas regressões múltiplas foram incluídas as duas variáveis anteriores, Tm e LnR.

As medidas de adequação e seleção dos modelos de regressão foram feitas através da análise do coeficiente de determinação (R^2), de correlação (R), teste F e do erro padrão da estimativa (Syx), considerando-se os modelos mais adequados aqueles de maior R^2, R , F e menor Syx. Procedeu-se também a análise visual dos resíduos ou erros de estimativa.

No experimento principal, conduzido em estufa piloto, investigou-se a correlação existente entre o teor de umidade da madeira (variável dependente) e algumas variáveis envolvidas nos processos de secagem convencionais, de baixa e de alta temperatura. As variáveis independentes, correlacionadas com o teor de umidade foram, variação da temperatura na pilha (TDAL), resistência elétrica da madeira, temperatura interna da madeira e coeficiente TM/TBU.

Através da análise de regressão simples e múltipla, realizadas com o software STATÍSTICA®, avaliou-se o grau de correlação existente entre as variáveis e o ajuste dos modelos. A comparação entre a curva de secagem obtida pelo método de pesagem da carga, e aquelas obtidas através das equações de regressão ajustadas, permitiram proceder uma avaliação técnica e operacional do uso das variáveis propostas, como alternativas para o monitoramento do processo de secagem da madeira.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. TESTES PRELIMINARES CONDUZIDOS EM ESTUFA DE LABORATÓRIO

A realização dos testes preliminares teve como objetivo estabelecer correlações entre a resistência elétrica e a temperatura da madeira com o seu teor de umidade, visando o desenvolvimento de modelos de regressão para serem testados por ocasião da secagem experimental em estufa piloto.

4.1.1. Correlação entre teor de umidade e resistência elétrica da madeira

No intervalo de umidade desde verde (TU > 100%) até o final da secagem, entre aproximadamente 6 e 8%, detectou-se baixa correlação entre as variáveis, evidenciada pelos baixos coeficientes (valores de R variando entre 0,62 e 0,82), baixos valores de teste de F, e elevados valores de erro padrão da estimativa (Syx), para as quatro temperaturas de secagem. As equações e as estimativas dos parâmetros obtidas, bem como as análises de variâncias calculadas, são apresentados nos anexos, nas Tabela A1, e A2, respectivamente.

Os baixos valores de R^2 e de F calculado, aliado aos altos valores de Syx, evidenciam a existência de um fraco ajuste do modelo de regressão linear que correlaciona o logaritmo da resistência elétrica medida e o teor de umidade da madeira acima do ponto de saturação das fibras teórico (PSFt), considerado no presente estudo como sendo aproximadamente 30%. Embora a maioria dos estudos anteriores confirmem que a correlação existente entre as variáveis se restringe à faixa de umidade acima citada, FORRER & VERMAAS (1987) haviam mencionado um intervalo maior, entre 8 a 75%. Entretanto, para os limites de umidade citados na Tabela A1 dos anexos, todas as possibilidades de obtenção de um bom ajuste do modelo aos dados coletados para as temperaturas de 50, 70, 90 e 110°C, não alcançaram êxito.

Na tentativa de melhorar esses modelos, adotou-se o mesmo procedimento para o intervalo de umidade entre o PSFt e teor de umidade final. O resultado da análise de regressão obtido para as quatro temperaturas de secagem, é mostrado na Tabela 5, e a análise da variância complementar encontra-se na Tabela A3 dos anexos.

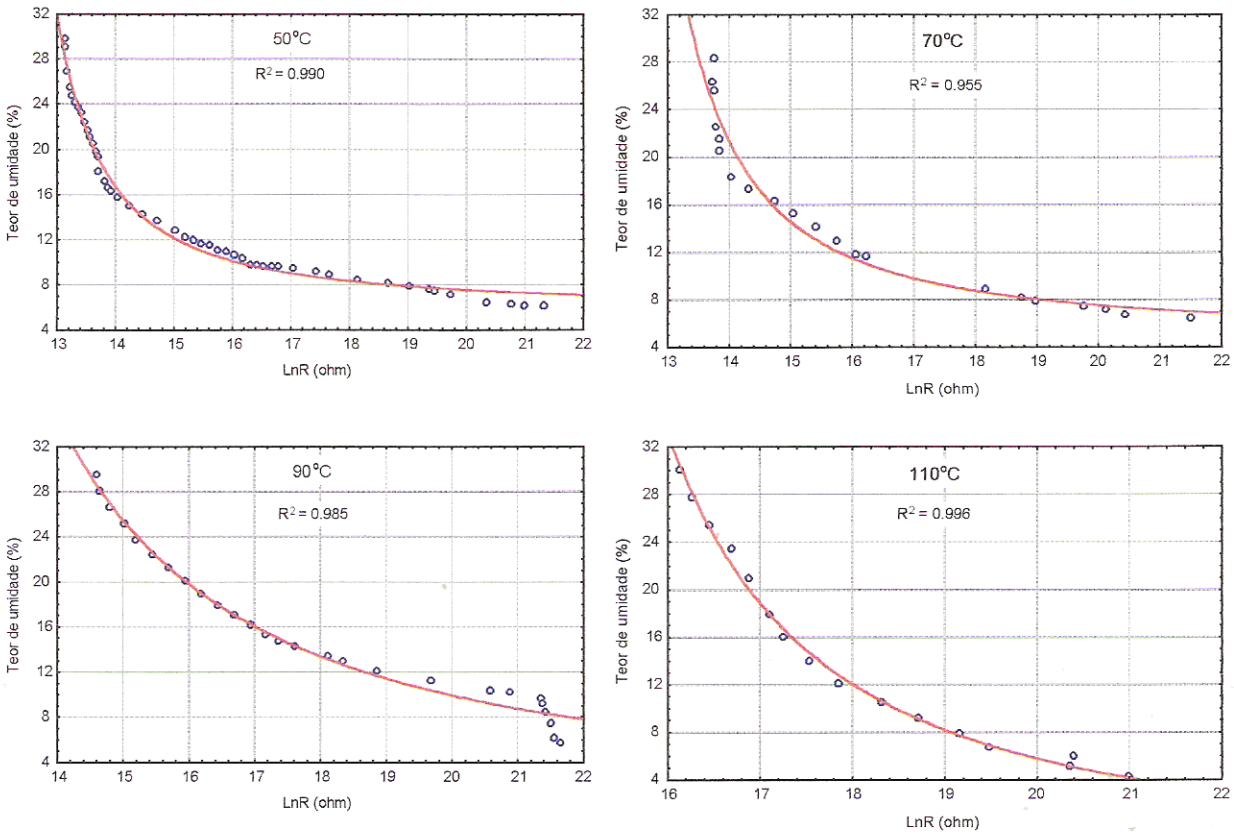
O modelo de equação de regressão exponencial que melhor se ajustou aos dados observados neste intervalo foi o mesmo utilizado por VERMAAS (1982b) para estimar a resistência elétrica da madeira de *Pinus pinaster* e *P. radiata*. Os resultados apresentados na Tabela 5 para madeira de *Pinus elliottii*, que mostram altos valores de R^2 e de F, e baixos erros padrão da estimativa, parecem evidenciar um bom ajuste do modelo utilizado no presente estudo. Esta constatação é confirmada pela Figura 22, que mostra as curvas exponenciais do teor de umidade em função do logaritmo da resistência elétrica da madeira, para as quatro temperaturas de secagem. A análise gráfica dos resíduos comprova que os modelos de regressão relacionados na Tabela 5 são bons e explicam a relação entre as duas variáveis. Portanto, permitem estimativas confiáveis do teor de umidade a partir da medição da resistência elétrica da madeira, na faixa entre aproximadamente 30% e a umidade final.

TABELA 5 - EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* ABAIXO DO PSFt (TESTES PRELIMINARES)

TS	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	N	R^2	Syx	F	TUI	TUF
50	$TU = 3,75569+e^{(0,63489LnR/(-10,5320+LnR))}$	49	0,990	0,6559	9261	29,8	6,1
70	$TU = 2,38605+e^{(0,80940LnR/(-10,1522+LnR))}$	21	0,955	1,4887	772	28,4	7,8
90	$TU = -6,3132+e^{(1,76441LnR/(-7,35127+LnR))}$	27	0,985	0,8512	3403	29,6	5,7
110	$TU = -6,3370+e^{(1,09485LnR/(-11,2341+LnR))}$	17	0,996	0,5712	4142	29,3	7,9

onde: TS = temperatura de secagem (°C); N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; TUI = teor de umidade inicial (%); TUF = teor de umidade final (%); LnR = logaritmo natural da resistência elétrica (ohm); PSFt = ponto de saturação das fibras teórico.

FIGURA 22 - TEOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DO LOGARITMO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA (LnR) ABAIXO DO PONTO DE SATURAÇÃO DAS FIBRAS TEÓRICO (TESTES PRELIMINARES)



4.1.2. Correlação entre teor de umidade e temperatura da madeira

A temperatura da madeira foi medida a ¼ da sua espessura, porque os valores obtidos nesta posição correlacionaram-se melhor com o teor de umidade gravimétrico que aqueles observados no centro ou na superfície da madeira. KOTOK et al. (1969), apoiados no efeito de resfriamento da superfície, produzido pelo calor de vaporização durante o período de taxa de secagem constante, acreditavam que a temperatura superficial era a mais indicada, mas encontraram um R^2 de apenas 0,68. No entanto, VERMAAS & NEVILLE (1988) relacionaram o teor de umidade com a temperatura superficial, temperatura interna e diferença entre temperatura do bulbo seco e temperatura interna, e acreditam que esta última é mais factível para ser aplicada em sistemas de controle.

A correlação entre o teor de umidade e a temperatura interna da madeira de *Pinus elliottii*, bem como as equações polinomiais, os coeficientes de correlação e os valores de F calculados, são apresentados na Tabela 6. Dentre os diversos modelos testados, o polinomial de quarto grau foi o que melhor se ajustou aos dados, nas quatro temperaturas de secagem, como ilustra a Figura 23. O coeficiente de determinação (R^2) calculado oscilou entre 0,988 e 0,996, evidenciando que houve um bom ajuste do modelo de regressão ao conjunto de dados observados nas quatro temperaturas de secagem. A análise da variância da regressão entre as duas variáveis, encontra-se na Tabela A4, nos anexos.

TABELA 6 - CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA E TEOR DE UMIDADE PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM (TESTES PRELIMINARES)

TS	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	R	Syx	F
50	$TU=452660,9-40926,3Tm+1384,971Tm^2-20,7812Tm^3+0,116623Tm^4$	0,996	2,799	2266,3
70	$TU=16390,27-1217,294Tm+33,9664Tm^2-0,4172468Tm^3+0,0018956Tm^4$	0,994	5,297	951,2
90	$TU=-42552,23+2097,91Tm-38,2665Tm^2+0,30703Tm^3-0,000916Tm^4$	0,998	1,638	5164,7
110	$TU=-6797,373+350,7039Tm-6,48246Tm^2+0,051971Tm^3-0,0001539Tm^4$	0,995	4,743	450,9

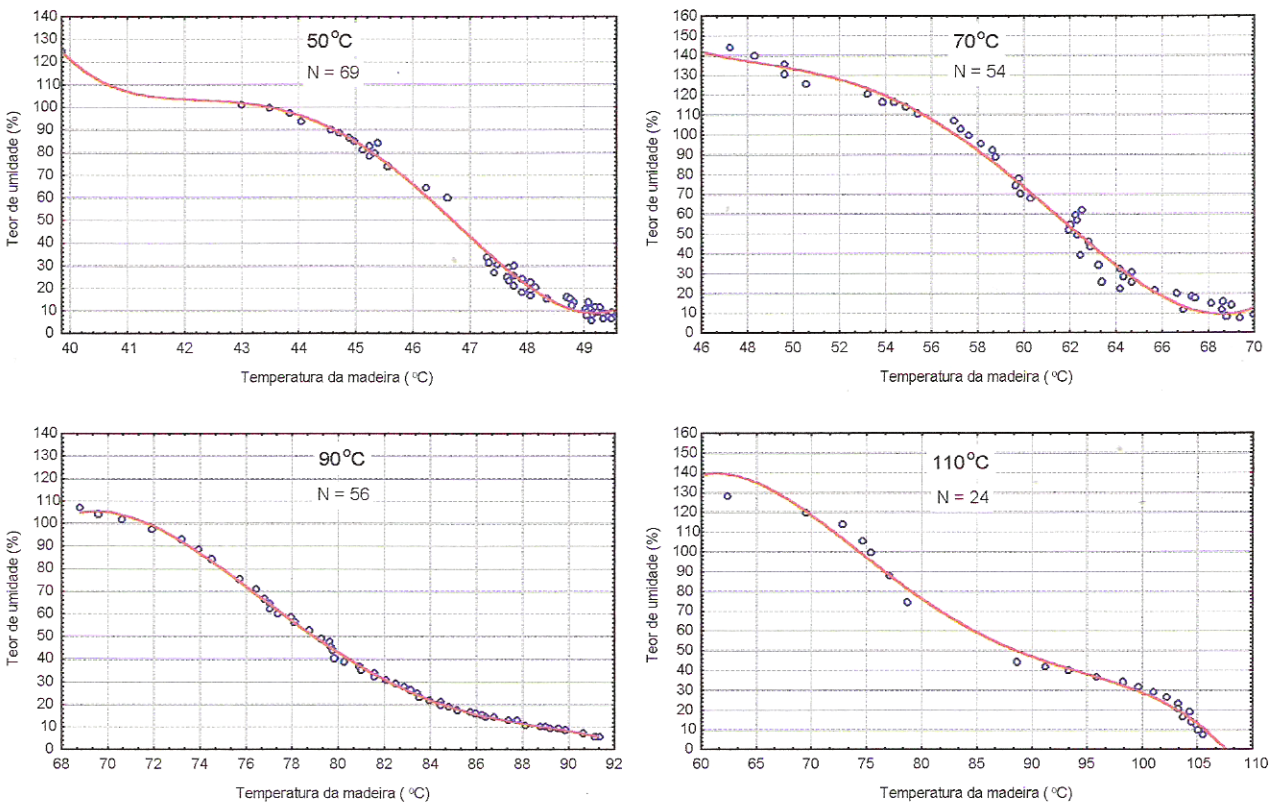
onde: TS = temperatura de secagem (°C); R = coeficiente de correlação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; TU = teor de umidade da madeira (%); Tm = temperatura da madeira (°C).

As dispersões observadas em cada modelo de regressão podem ser atribuídas às oscilações na temperatura provocadas pela imprecisão do termostato. A necessidade de manter a temperatura do bulbo seco constante durante a operação de secagem, foi um dos pontos destacados nos estudos de PANOW & NESTER (1985).

Os resultados mostrados na Tabela 6 e Tabela A4 (anexos) evidenciam a existência de estreita correlação entre teor de umidade e temperatura da madeira, desde verde até o final da secagem, para as quatro temperaturas estudadas. Esta constatação é apoiada pelas análises favoráveis dos parâmetros estatísticos, dos resíduos e da variância. Estudos anteriores já haviam evidenciado a importância da temperatura interna como indicadora do teor de umidade

interno da madeira durante a secagem a alta temperatura (PANOW & NESTER, 1984), e principalmente, para a consecução do final da secagem (KEYLWERTH et al., 1955; TOMASELLI, 1977).

FIGURA 23 - CORRELAÇÕES OBTIDAS NOS TESTES PRELIMINARES ENTRE TEOR DE UMIDADE E TEMPERATURA DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII*, MEDIDA A ¼ DA ESPESSURA, PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM (N = NÚMERO DE OBSERVAÇÕES)



4.1.3. Correlação entre teor de umidade, resistência elétrica e temperatura da madeira

Os modelos matemáticos tradicionalmente utilizados no desenvolvimento dos medidores de umidade consideram o logaritmo da resistência elétrica como uma função do teor de umidade da madeira abaixo do PSF (SKAAR, 1972), porque nesta faixa higroscópica as variáveis se correlacionam melhor. Nos modelos determinados por VERMAAS (1982b) para

Pinus pinaster e *Pinus radiata*, foram usados teores de umidade médios entre 3,2 e 24,6%. Acima do PSF as alterações em resistência elétrica são muito pequenas para permitir medições precisas no teor de umidade. Nesses níveis, a medição do teor de umidade é insegura devido a uma correlação irregular entre resistência e teor de umidade (WENGERT, 1992).

Numa tentativa de minimizar as imprecisões das medições dos medidores tipo resistência elétrica, acima do PSF, e a partir dos resultados obtidos no item anterior, incluiu-se a temperatura da madeira nos modelos. As equações de regressão, bem como as estimativas dos parâmetros encontradas para as quatro temperaturas de secagem estudadas, são apresentados na Tabela 7. A análise da variância dessa regressão é apresentada na Tabela A5, nos anexos.

TABELA 7 - MODELOS DE EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA ESTIMAR O TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA TEMPERATURA DA MADEIRA E LOGARITMO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA

TS	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	N	R^2	Syx	F	TUI	TUF
50	$TU = e^{(25,6797 - 0,4310Tm - 0,1417LnR)}$	55	0,995	0,0636	5183,1	144,7	6,1
70	TU = 468,9750 - 7,1609Tm - 2,1382LnR	47	0,965	8,1185	632,1	151,0	7,8
90	TU = 470,6317 - 6,0656Tm + 4,0916LnR	44	0,997	1,5704	7531,4	150,1	5,7
110	TU = 312,6704 - 2,8897Tm + 0,2158LnR	21	0,983	5,3275	584,1	118,0	8,3

onde: TS = temperatura de secagem (°C); N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; TU = teor de umidade da madeira (%); TUI = teor de umidade inicial (%); TUF = teor de umidade final (%); e = exponencial; Tm = temperatura da madeira (°C); LnR = logaritmo natural da resistência elétrica.

A inclusão da variável temperatura da madeira nos modelos testados, em comparação com os resultados mencionados no item 4.1.1. para o intervalo de umidade desde verde até madeira seca, contribuiu para melhorar as estimativas dos parâmetros indicadoras da qualidade dos mesmos. O confronto da Tabelas A1 com a Tabela 6, mostra que o acréscimo da temperatura da madeira nos modelos de regressão linear, produziu coeficientes de determinação e valores de F mais elevados, e erro padrão da estimativa e resíduos menores. Isto significa, que neste intervalo de umidade a temperatura da madeira se correlaciona melhor

com o teor de umidade que a resistência elétrica. Deve-se ressaltar, contudo, que os modelos de regressão utilizados, embora considerados lineares, foram distintos em ambas as análises.

Estas evidências podem ser confirmadas através da comparação entre as Tabelas 6 e 7, onde se verifica que a inclusão do logaritmo da resistência elétrica na correlação entre a temperatura da madeira e o teor de umidade para o período de secagem, desde verde até madeira seca, não melhora os modelos de regressão. Ao contrário, o acréscimo da resistência elétrica age negativamente, aumentando o resíduo e o erro padrão da estimativa e diminuindo o coeficiente e o valor de F calculado, como foi detectado para as temperaturas de 70 e 110°C.

Essa influência da resistência elétrica sobre os modelos de regressão obtidos, deve-se a sua baixa correlação com o teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras, conforme discutido anteriormente, e a oscilação da temperatura da estufa. Essa oscilação provoca variações desproporcionais tanto na resistência elétrica como na temperatura da madeira. Com a elevação da temperatura de secagem, a resposta dessas variáveis não é imediata, o que pode provocar medições errôneas. Para minimizar este efeito, adotou-se como sistemática a leitura das variáveis exatamente no instante em que a temperatura da estufa atingiu o valor preestabelecido para cada tratamento, durante a sua queda. Com essa providência foi possível obter modelos de regressão mais ajustados, para as quatro temperaturas de secagem.

4.2. EXPERIMENTO PRINCIPAL CONDUZIDO EM ESTUFA PILOTO

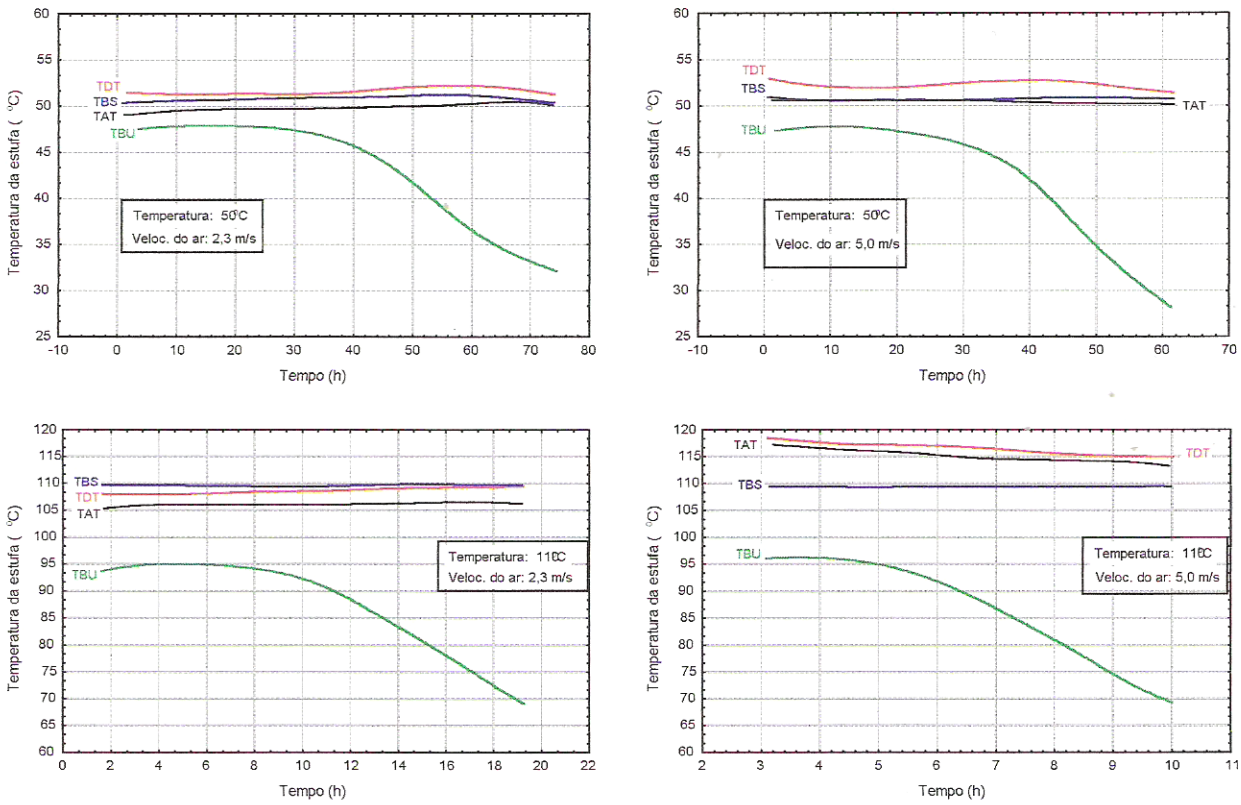
4.2.1. Condução do processo de secagem

4.2.1.1. Condições internas da estufa

Em razão de suas dimensões, que a inclui entre as semindustriais, a estufa de secagem utilizada apresentou algumas variações nas condições internas, as quais foram monitoradas através de sensores de temperatura colocados em locais considerados estratégicos. Além dos termômetros de bulbo seco (tbs) e bulbo úmido (tbu), cujas posições são mostradas na Figura 15, sensores instalados antes e depois do trocador de calor, permitiram avaliar o gradiente de temperatura interno da câmara durante a secagem da madeira. Este procedimento foi adotado para os quatro programas de secagem e as duas velocidades de ar. As curvas de temperatura

elaboradas para duas delas são apresentadas na Figura 24. As curvas obtidas para os programas de 70 e 90°C mostraram uma tendência semelhante nas duas velocidades de ar utilizadas, porém com valores intermediários aos processos de 50 e 110°C, ilustrados na Figura 24.

FIGURA 24 - CONDIÇÕES DE TEMPERATURA DA ESTUFA DE SECAGEM PARA OS PROGRAMAS DE 50 E 110°C E DUAS VELOCIDADES DE AR (TBS = TEMPERATURA DO BULBO SECO; TBU = TEMPERATURA DO BULBO ÚMIDO; TAT = TEMPERATURA ANTES DO TROCADOR; TDT = TEMPERATURA DEPOIS DO TROCADOR DE CALOR)



Nas curvas representativas dos processos de baixa (50°C) e alta temperatura (110°C), verificou-se que o gradiente de temperatura dentro da câmara foi influenciado pela temperatura de secagem e pela velocidade do ar. No programa de 110°C, o gradiente de temperatura para a velocidade do ar de 5,0 m/s foi menor do que para a de 2,3 m/s, encontrando-se valores médios de 1,6 e 2,8°C, respectivamente. Já para o processo de secagem a baixa temperatura, o gradiente médio de temperatura foi praticamente o mesmo para as duas velocidades de ar.

O sensor responsável pela temperatura do bulbo seco foi controlado através de acionamentos comandados pelo software residente. O controle da temperatura do bulbo seco foi realizado sem o uso de tolerâncias, de forma que o acionamento do sistema de aquecimento (liga/desliga) ocorreu sempre que uma leitura acima ou abaixo do valor programado tenha sido observada.

Embora os curvas ilustradas na Figura 24 mostrem as condições reais e não as ideais, principalmente devido a ocorrência de gradientes de temperatura relativamente altos, no geral o sistema funcionou satisfatoriamente. A temperatura do bulbo seco mínima e máxima detectada para o programa de 50°C e alta velocidade de ar foram, respectivamente, 49,1 e 50,8°C, enquanto que para o de 110°C, encontrou-se valores entre 107,2 e 111,5°C. Para baixa velocidade de ar, a diferença de temperatura foi pouco maior para o programa de 110°C, e substancialmente mais elevada (5,8°C) para o programa de 50°C.

4.2.1.2. Curvas de secagem

As curvas de secagem obtidas para a madeira de *Pinus elliottii*, nos quatro programas de temperatura e duas velocidades de ar, são apresentadas na Figura 25. Uma análise comparativa visual das curvas evidencia a influência da temperatura e da velocidade do ar no processo. Ao estabelecer-se o cálculo de um coeficiente para comparar os quatro programas com referência a velocidade de ar, dividindo-se o tempo de secagem a baixa velocidade (A) pelo tempo a alta velocidade de ar (B), encontraram-se os valores de 1,2 (50°C); 1,5 (70°C); 1,5(90°C) e 1,9 (110°C). Esses resultados indicam que, à exceção da secagem a baixa temperatura, onde o efeito é quase desprezível, a medida que aumenta a temperatura de secagem, aumenta também a rapidez do processo. Na secagem a 110°C, o aumento da velocidade de ar de 2,3 para 5,0 m/s, praticamente reduziu o tempo de secagem pela metade. Um confronto direto entre as curvas de baixa e alta temperatura de secagem e velocidade do ar, como mostra a Figura 26, permite visualizar melhor essas diferenças.

Informações gerais sobre os quatro programas de secagem, como número de observações, teor de umidade inicial e final da madeira, e tempo de secagem, são apresentadas na Tabela 8. Durante a secagem, registraram-se velocidades de ar de 2,3 m/s, quando madeira e separadores de 25 mm de espessura foram utilizados. A velocidade de ar de 5,0 m/s, foi

obtida de acordo com a metodologia previamente descrita. Os valores foram confirmados com o uso de um anemômetro digital, medindo-se a velocidade do ar no espaço entre tábuas onde colocaram-se os sensores para medir a variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL).

FIGURA 25 - CURVAS DE SECAGEM PARA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* COM 25 MM DE ESPESSURA SUBMETIDA À QUATRO PROGRAMAS DE TEMPERATURA E DUAS VELOCIDADES DE AR

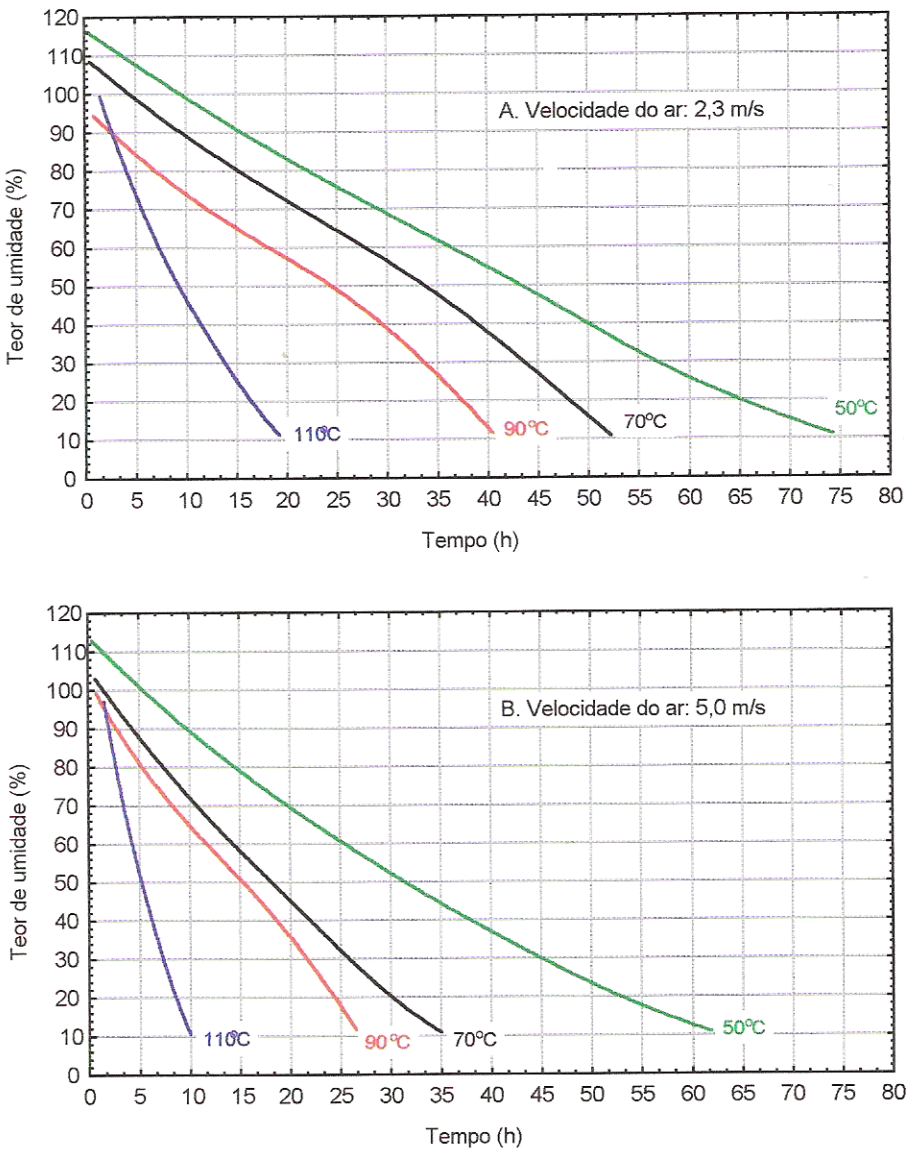


FIGURA 26 - CURVAS DE SECAGEM PARA A MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* COM 25 MM DE ESPESSURA SUBMETIDA ÀS TEMPERATURAS DE 50 E 110°C E DUAS VELOCIDADES DE AR

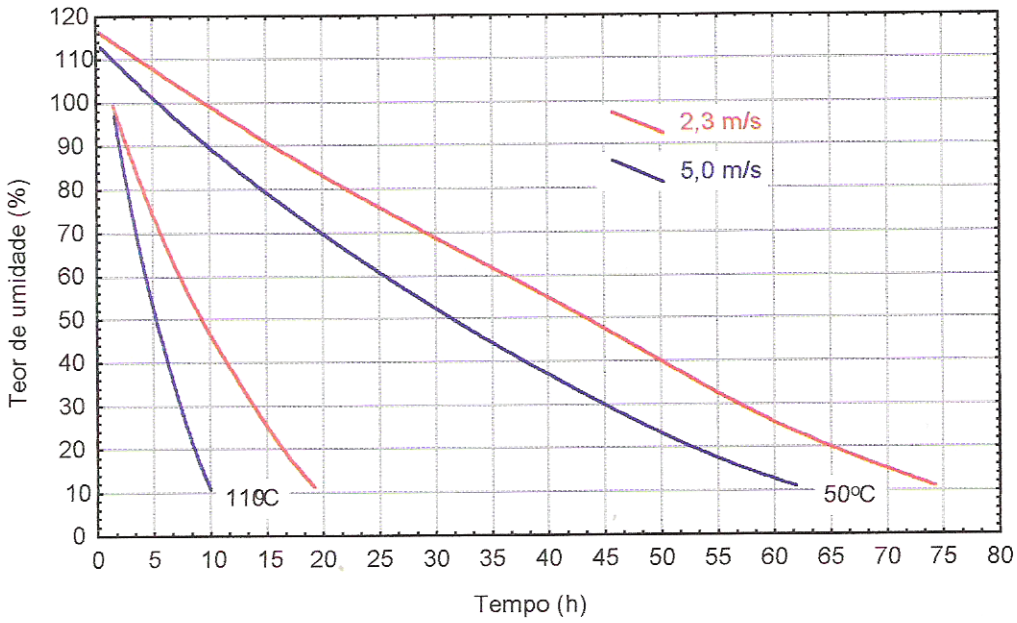


TABELA 8 - NÚMERO DE OBSERVAÇÕES, TEOR DE UMIDADE E TEMPO DE SECAGEM PARA OS QUATRO PROGRAMAS DE TEMPERATURA E DUAS VELOCIDADES DE AR

TS °C -	V m/s -	N -	TUI - % -	TUF - % -	TEMPO - h -
50	2,3	3058	114,8	10,0	74,7
50	5,0	3194	114,9	9,8	62,2
70	2,3	2327	108,8	10,0	52,5
70	5,0	1808	104,7	9,9	35,2
90	2,3	2076	100,0	9,9	40,6
90	5,0	1322	105,8	10,0	26,7
110	2,3	719	101,6	10,0	19,3
110	5,0	446	97,0	9,9	10,0

onde: TS = temperatura de secagem; V = velocidade do ar; N = número de observações; TUI = teor de umidade inicial; TUF = teor de umidade final.

Os valores de teor de umidade apresentados na Tabela 8 correspondem ao momento em que a estufa atingiu a temperatura programada (TUI) e quando o software encerrou o processo (TUF). Após o encerramento da secagem, determinou-se gravimetricamente o teor de umidade de cada peça componente da carga, e o valor médio obtido para cada temperatura ficou próximo daqueles mostrados na Tabela 8. O número de observações (N) representa a quantidade de dados coletados para cada variável durante período de secagem, medidos em intervalos de aproximadamente 80 segundos. O tempo de secagem se refere ao período decorrido desde o acionamento da estufa, até o seu desligamento, quando o teor de umidade final foi atingido.

4.2.1.3. Dispersão dos dados

A coleta de dados durante a fase experimental, em cada um dos quatro programas de secagem e nas duas velocidades de ar, foi influenciada pela circulação de ar através da pilha de madeira e pelo sistema de ventilação da estufa. As observações referentes a teor de umidade, variação da temperatura na pilha (TDAL), temperatura da madeira e resistência elétrica, apresentaram dispersões em relação ao modelo ajustado para cada uma dessas variáveis.

A incidência do fluxo de ar sobre a pilha de madeira, suspensa por um dispositivo especial conectado a uma célula de carga, produziu oscilações nas leituras do peso e, consequentemente, no cálculo do teor de umidade gravimétrico. Além disso, o sistema de ventilação da estufa, que auxilia o controle da umidade relativa, é do tipo não proporcional, o que significa que as janelas para entrada e saída de ar permanecem totalmente ou abertas ou fechadas quando acionadas pelo programa de secagem. A interferência das condições climáticas externas no ambiente da estufa, provocada pela abertura total das janelas, também influiu no monitoramento do processo.

A combinação dos efeitos da circulação do ar sobre a pilha de madeira, e do sistema não proporcional utilizado para abertura das janelas de ventilação, causou instabilidade no processo de coleta de dados, resultando, como conseqüência, a dispersão evidenciada na análise de regressão.

4.3. CORRELAÇÕES ENTRE TEOR DE UMIDADE E AS VARIÁVEIS ESTUDADAS

4.3.1. Variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL)

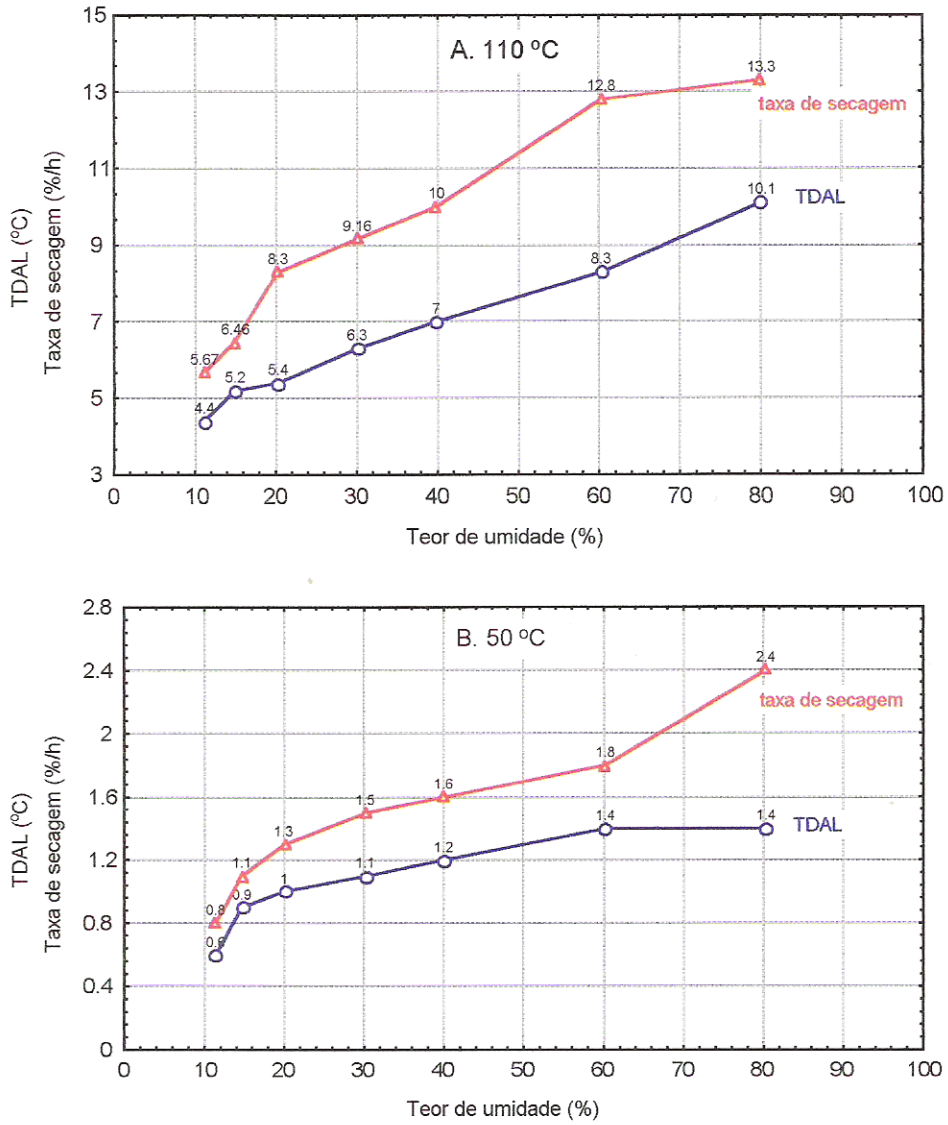
4.3.1.1. Importância da TDAL para o controle do processo de secagem

De acordo com a revisão apresentada no item 2.6.2.1., TDAL é utilizada principalmente para acusar o final do processo de secagem. Entretanto, OLIVEIRA (1995) acredita que o controle da velocidade de secagem, visando a redução do gradientes de umidade da madeira e, consequentemente, as tensões de secagem, são suas funções mais importantes. Porém, a TDAL não é a mesma nos vários espaços de passagem de ar entre tábuas, e segundo ZIEGLER (1988), esta é sua principal desvantagem como meio de controle do processo de secagem em estufa. Os princípios desenvolvidos por ECKELMAN & BAKER (1976), que relacionam a TDAL com a massa de água evaporada, acrescentaram o uso desta variável nos cálculos do volume da mistura ar seco/vapor d'água requerido para retirar uma determinada quantidade de água da pilha de madeira. A partir desses estudos, a TDAL tornou-se um fator importante para os cálculos de vazão de ar e dimensionamento de secadores de madeira.

4.3.1.2. Relação entre TDAL e taxa de secagem

A relação entre a TDAL e a taxa de secagem, em função do teor de umidade da madeira, obtida para os programas de secagem de 110°C e 50°C e velocidade do ar de 5,0 m/s, é mostrada na Figura 27. Tanto o teor de umidade como a TDAL foram obtidos através da média aritmética das 10 leituras mais próximas dos estágios de 80, 60, 40, 30, 20, 15 e 10% de umidade. Já a taxa de secagem, foi calculada através da relação entre a diferença percentual de dois intervalos de umidade e o tempo decorrido, sendo expressa em %/hora. Observou-se que tanto a taxa de secagem como a TDAL diminuíram, a medida que o teor de umidade da carga de madeira foi reduzido até 10%. As duas variáveis mantiveram uma relação aproximadamente proporcional durante todo o período de secagem, como mostram as curvas da Figura 27, para as temperaturas de 110°C (A) e 50°C (B).

FIGURA 27 - RELAÇÃO ENTRE TDAL E TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE PARA A MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* NAS TEMPERATURAS DE 110 E 50°C E VELOCIDADE DO AR DE 5,0 M/S

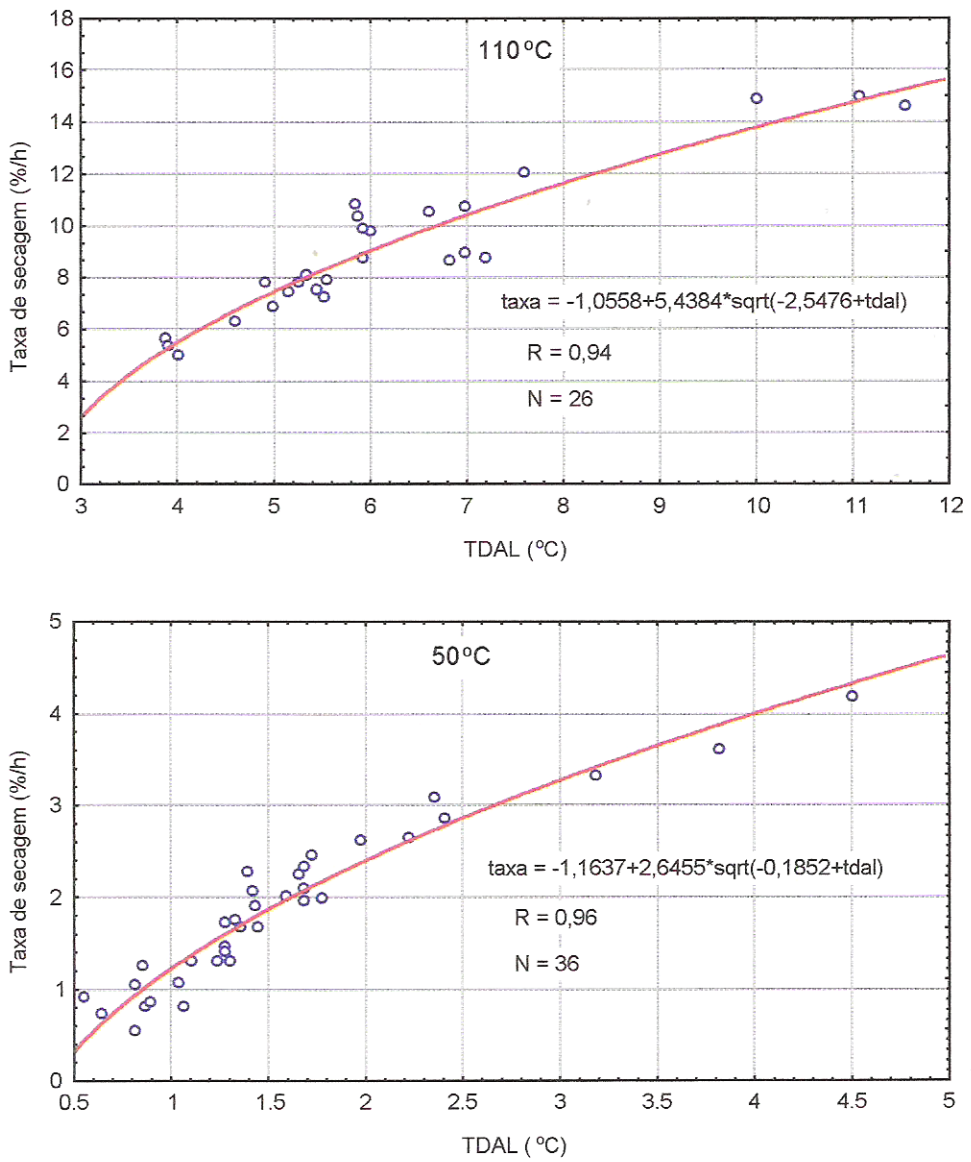


A ocorrência de altas taxas de secagem é comum no início do processo (SCHNEIDER, 1972). Porém, a partir do momento em que a água superficial é evaporada da madeira, a taxa torna-se decrescente. Os altos valores encontrados neste estudo, principalmente para o processo de secagem alta temperatura, estão associados também à madeira de *Pinus elliottii* utilizada, material considerado altamente permeável, e cuja movimentação interna da umidade se dá rapidamente. A Figura 27 revela, que no processo a alta temperatura (110°C), a taxa de

secagem foi aproximadamente seis vezes maior que no a baixa temperatura (50°C), ambos submetidos à mesma velocidade do ar, de 5,0 m/s.

A Figura 28 mostra uma comparação estabelecida entre TDAL e a taxa de secagem, empregando-se a mesma metodologia adotada para confeccionar a Figura 27, porém com um número maior de observações. A função raiz quadrada, as curvas resultantes, e os coeficientes

FIGURA 28 - CORRELAÇÃO ENTRE TAXA DE SECAGEM E TDAL PARA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* SUBMETIDA ÀS TEMPERATURAS DE 110°C E 50°C E VELOCIDADE DO AR DE 5,0 M/S



apresentados na Figura 28, para a velocidade do ar de 5,0 m/s, evidenciam a existência de uma boa correlação entre taxa de secagem e TDAL nas temperaturas de 110°C (R = 0,94) e 50°C (R = 0,96). Para a velocidade do ar de 2,3 m/s, entretanto, encontrou-se baixa correlação nas duas temperaturas de secagem.

Estes resultados, além de estabelecer uma relação matemática entre as duas variáveis, confirmam as evidências de STEVENS & JOHNSTON (1957), que a taxa de secagem diminui com o decréscimo da TDAL. Mais recentemente, OLIVEIRA (1986), citado por TAYLOR & LANDOCH (1990), demonstrou que o uso de equações que incorporam a TDAL permite a obtenção da taxa de secagem com êxito. As conclusões dessas e outras pesquisas, aliadas aos resultados obtidos neste estudo, evidenciam a importância da TDAL, não apenas como medida de taxa de transferência de calor para a madeira, mas também como parâmetro de controle do processo de secagem.

4.3.1.3. Variáveis que influem na relação TDAL/teor de umidade da madeira.

Uma correlação polinomial entre TDAL e teor de umidade da carga de madeira foi estabelecida para as quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar, e as equações de regressão são apresentadas na Tabela 9. Apesar dos resultados mostrarem uma relação coerente entre as variáveis com aquela descrita na literatura (TAYLOR & LANDOCH, 1990), ou seja, a redução da TDAL com o decréscimo do teor de umidade da madeira, as estimativas dos parâmetros evidenciam uma fraca correlação para as temperaturas de 50, 70 e 90°C. Esta constatação é confirmada pelos baixos coeficientes de correlações (Tabela 9) e as elevadas somas dos quadrados dos resíduos (Tabela A6, dos anexos) encontradas, o que aumenta a possibilidade de erros associados com a estimativa da TDAL para as três temperaturas.

A baixa correlação encontrada entre a TDAL e o teor de umidade da madeira, pode ser explicada pelas seguintes causas:

a) sob temperaturas de secagem baixas, a taxa de transferência de calor para a superfície da madeira é reduzida, resultando numa baixa taxa de secagem e valores de TDAL pequenos e instáveis. VERMAAS & NEVILLE (1988) também se depararam esta dificuldade durante a secagem de madeira; e

b) a dispersão dos dados provocada pela instabilidade da velocidade do ar e do sistema de coleta de dados, conforme discutido anteriormente, prejudicou o ajuste.

Contudo, para a temperatura de 110°C, a correlação entre as duas variáveis foi de 0,77 para a velocidade do ar de 2,3 m/s, e de 0,93 para a de 5,0 m/s, ao nível de 1% de probabilidade (Tabela 9). Nesse programa de secagem, principalmente quando a velocidade de 5,0 m/s foi utilizada, obteve-se uma TDAL mais alta do que a encontrada para as demais temperaturas, e o modelo de regressão testado se ajustou melhor aos dados. HERZBERG et al. (1985) também mencionam a ocorrência de valores mais elevados para temperaturas altas, que para baixas temperaturas.

A Figura 29 mostra a influência da temperatura de secagem na relação TDAL/teor de umidade, para as quatro temperaturas submetidas a velocidade do ar de 2,3 m/s, e confirma os resultados discutidos acima. Um comportamento similar é visualizado na Figura 30 para as temperaturas de 50 e 110°C e duas velocidades de ar. As duas Figuras (29 e 30) mostram que, para um mesmo teor de umidade, quanto maior a temperatura de secagem utilizada, maior foi a TDAL. Além disso, a curva polinomial para 110°C destaca-se das demais, apresentando valores bem superiores (Figura 29).

FIGURA 29 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE SECAGEM NA RELAÇÃO ENTRE TDAL E TEOR DE UMIDADE PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E VELOCIDADE DO AR DE 2,3 M/S

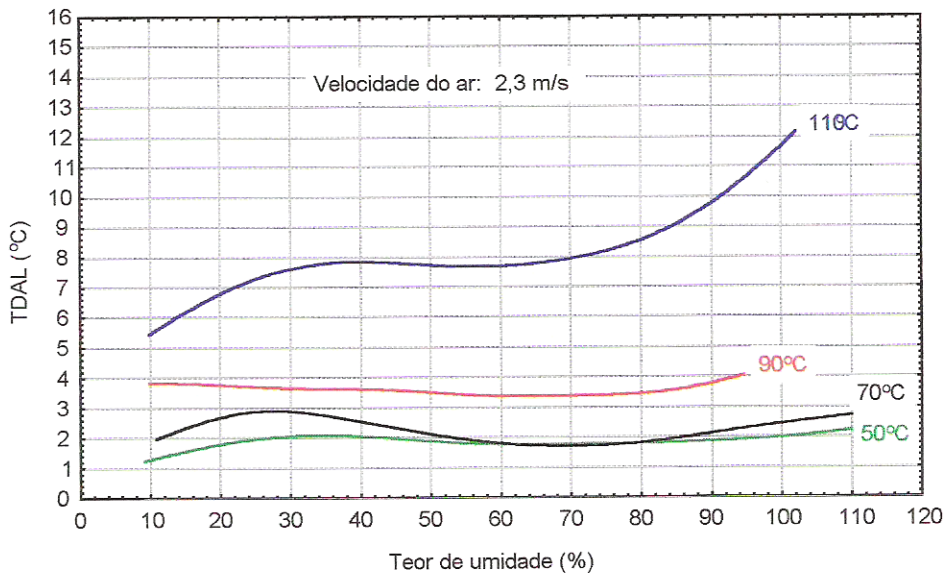


TABELA 9 - CORRELAÇÃO ENTRE TDAL E TEOR DE UMIDADE PARA A FAIXA DE UMIDADE DESDE VERDE ATÉ 10% E EQUAÇÕES RESULTANTES

TS	V	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	N	R	Syx	F
50	2,3	$y = 0,514981+0,088768tu-0,001697tu^2+0,000009568tu^3$	3058	0,372	0,7072	163,55**
50	5,0	$y = 0,081669+0,081350tu-0,001502tu^2+0,000009194tu^3$	3194	0,583	0,6864	547,29**
70	2,3	$y = 0,594937+0,175942tu-0,004070tu^2+0,000025000tu^3$	2327	0,443	1,1261	189,75**
70	5,0	$y = 0,772385+0,097935tu-0,002222tu^2+0,000015000tu^3$	1808	0,403	1,1372	116,35**
90	2,3	$y = 0,263956+0,272192tu-0,006287tu^2+0,000043000tu^3$	2076	0,505	1,0347	237,03**
90	5,0	$y = 1,729165+0,082959tu-0,002792tu^2+0,000024000tu^3$	1322	0,721	0,8735	476,24**
110	2,3	$y = 2,022841+0,382981tu-0,007870tu^2+0,000051000tu^3$	719	0,767	0,9541	342,02**
110	5,0	$y = 0,774121+0,461406tu-0,015458tu^2+0,000224tu^3-0,000001tu^4$	446	0,930	0,8254	703,60**

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); N = número de observações; R = coeficiente de correlação; Syx = erro padrão da estimativa; F = F calculado; y = tdal; tu = teor de umidade da madeira

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Embora apenas a velocidade de 2,3 m/s seja ilustrada na Figura 29, as curvas para a velocidade de 5,0 m/s apresentaram o mesmo comportamento, diferindo somente em grandezas, donde se conclui que a influência da temperatura de secagem na relação TDAL/teor de umidade conserva a mesma tendência, independente da velocidade de circulação do ar.

A medição da temperatura do ar no sentido da largura da pilha de madeira, foi realizada sempre no mesmo espaço deixado pelos separadores, numa posição central entre a segunda e a terceira camadas de tábuas. Este procedimento foi adotado porque a queda da temperatura através da pilha não é a mesma em todos os espaços de passagem, variando do topo para a base. Segundo ZIEGLER (1988), este é o ponto mais importante a ser considerado na utilização da TDAL como meio de controle da secagem. Além disso, se houver fuga de ar pelos extremos da pilha, sua mistura com o ar que passa através da pilha provoca um aumento da temperatura na saída de ar, reduzindo o valor da TDAL.

A velocidade de circulação do ar exerce um efeito marcante sobre a relação TDAL/teor de umidade. O uso de velocidades de ar mais elevadas, aumenta a taxa de secagem (PRICE & KOCH, 1981), a qual influi na TDAL (TAYLOR & LANDOCH, 1990). Em geral, quanto mais rápida a secagem, mais alta é a TDAL. (HOLMES, 1988).

O efeito da velocidade do ar sobre a taxa de secagem é mais pronunciado durante o período de taxa constante, quando a madeira possui altos teores de umidade, e permanece constante durante todo este período (KOLLMANN & SCHNEIDER, 1960; SCHNEIDER, 1972). Durante o período de taxa de secagem decrescente, o efeito diminui continuamente, e eventualmente torna-se insignificante (SALAMON & MCINTYRE, 1969; SCHNEIDER, 1972). O teor de umidade crítico em que o teor de umidade deixa de ser importante, varia com a espécie, sendo relativamente baixo para madeira fina, para condições de secagem suaves e para teores de umidade iniciais baixos (KOLLMANN & SCHNEIDER, 1960). Na secagem convencional de *Liriodendron tulipifera* L., STEINHAGEN (1974) só detectou efeito estatisticamente significante da velocidade do ar sobre a taxa de secagem, até aproximadamente 40% de umidade. Abaixo deste ponto crítico, e por razões econômicas, recomendou o uso de velocidades inferiores a 1,25 m/s até o final da secagem.

Recentemente foi desenvolvido pela Forintek do Canadá, um programa de fluxo de ar variável, onde os motores dos ventiladores são dotados de mecanismos de velocidade ajustável (ASD), com o objetivo de reduzir o consumo de energia e o tempo de secagem (GARRAHAN et al., 1993). Segundo WENGERT & DENIG (1995), este método tem sido utilizado para

tentar manter a TDAL constante durante o processo de secagem, o que requer velocidades altas no início do programa e mais baixas a medida que a madeira seca.

A Figura 30 mostra que, no início da secagem, foram obtidos valores de TDAL mais altos para a velocidade de ar de 5,0 m/s do que para a de 2,3 m/s, tanto para a baixa como para a alta temperatura. Entretanto, abaixo de aproximadamente 90% e 60% de teor de umidade nas baixa e alta temperaturas, respectivamente, ocorreu uma inversão nas curvas, resultando uma TDAL menor e decrescente até o final do processo, quando velocidades de 5,0 m/s foram utilizadas. Este comportamento da TDAL pode ser explicado, em parte, pela sua dependência da taxa de secagem, conforme discutido anteriormente. Provavelmente, 90% e 60% são, respectivamente, os teores de umidade críticos para as temperaturas de 50°C e 110°C, e abaixo desses valores o efeito da velocidade do ar sobre a taxa de secagem deixa de ser importante. O teor de umidade crítico encontrado por STEINHAGEM (1974), para temperaturas convencionais, foi em torno de 40%, acima do qual ele detectou efeito estatisticamente significante apenas quando a velocidade do ar aumenta substancialmente.

Os resultados apresentados na Tabela 9 e a análise da variância da Tabela A6 (anexos) para a temperatura de secagem de 110°C, evidenciam que a velocidade de 5,0 m/s produziu um melhor ajuste nos modelos de regressão e uma maior correlação entre as duas variáveis, em comparação com os valores encontrados para a velocidade de 2,3 m/s. O emprego de altas temperaturas e altas velocidades de ar nas estufas de secagem, resultam em aumento da taxa de transferência de calor para a madeira e, consequentemente, em maiores taxas de secagem, conforme discussão anterior. A combinação desses dois componentes, altas temperatura de secagem e velocidade de ar, podem produzir modelos de regressão bem ajustados, com excelentes correlações entre TDAL e teor de umidade da madeira.

A velocidade do ar também influi na relação entre a TDAL e a temperatura de secagem, como mostra a Figura 31. Esta foi confeccionada plotando-se, para as quatro temperatura de secagem e duas velocidades de ar, a média das últimas dez observações de TDAL medidas no final do processo, em função da temperatura. A análise visual da Figura 31 mostra que, para as temperaturas de 50, 70 e 90°C, a diferença entre os valores de TDAL obtidos nas velocidades de 2,3 e 5,0 m/s é muito pequena (em torno de 0,5°C), o que evidencia um efeito negligenciável da velocidade do ar sobre a TDAL. Contudo, acima de aproximadamente 90°C, as curvas assumem direções divergentes, e a diferença de TDAL entre as duas velocidades de ar torna-se crescentemente maior. O aumento na velocidade do ar, de

2,3 para 5,0 m/s, causa uma diminuição tão substancial na TDAL, que para a temperatura de 110°C o seu valor foi reduzido pela metade.

FIGURA 30 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR NA RELAÇÃO ENTRE TDAL E TEOR DE UMIDADE PARA AS TEMPERATURAS DE 50°C E 110°C

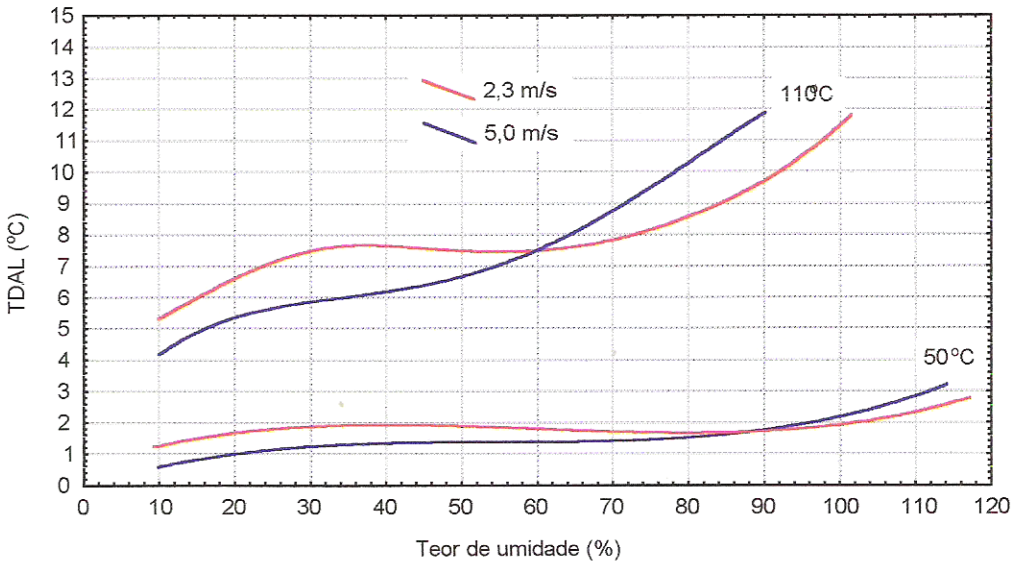
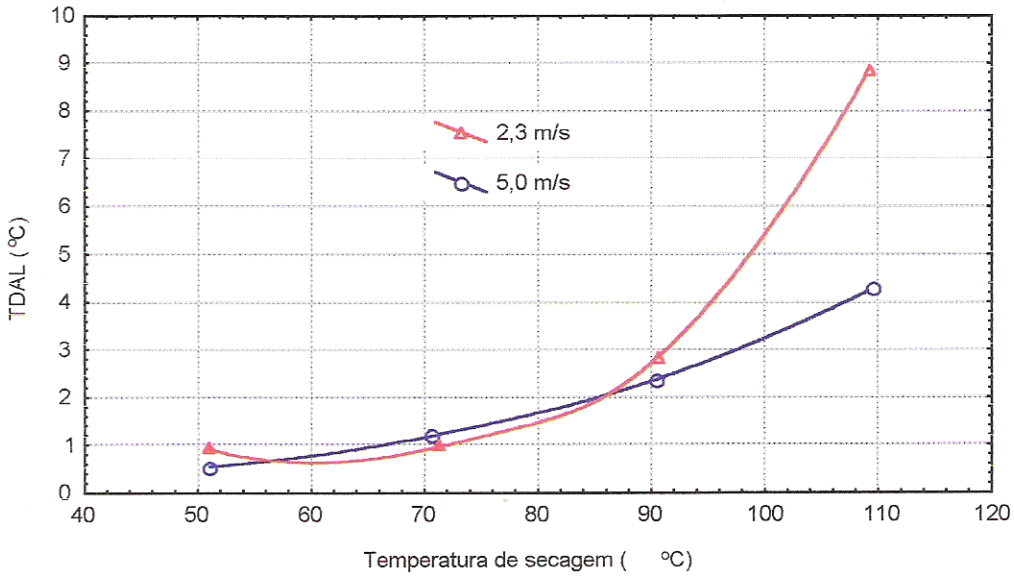


FIGURA 31 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR NA RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DE SECAGEM E A TDAL (MÉDIA DAS ÚLTIMAS DEZ OBSERVAÇÕES)



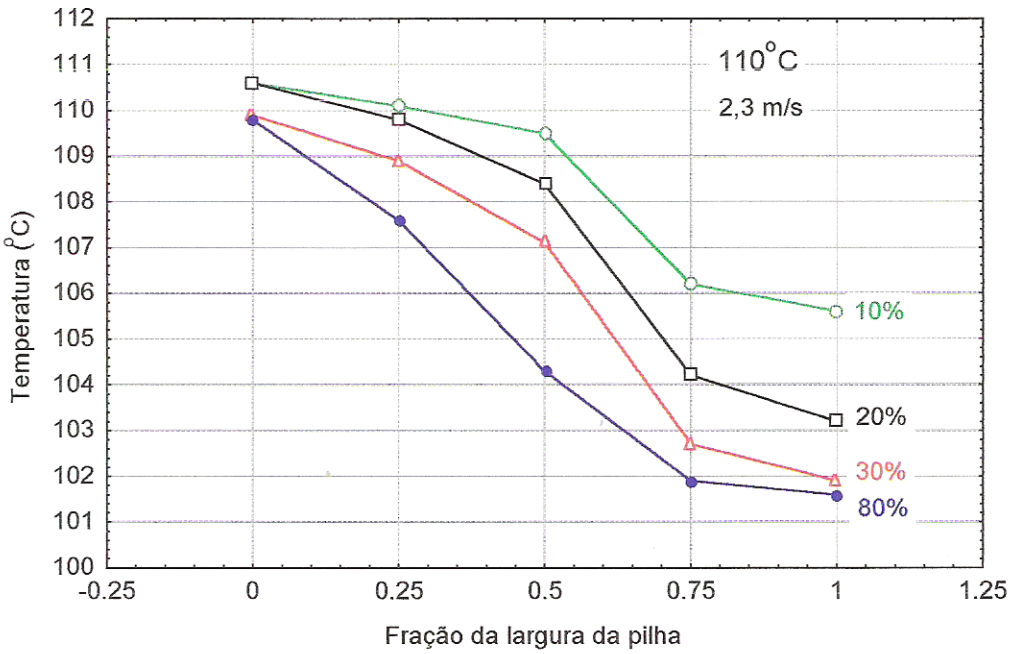
4.3.1.4. Influência da temperatura de secagem na TDAL

A influência da temperatura de secagem na TDAL, independente da velocidade do ar, também pode ser observada nas Figuras 30 e 31. Verifica-se que, para um mesmo valor de teor de umidade (Figura 30) e velocidade do ar (Figura 31), o aumento da temperatura de secagem produz um TDAL mais elevado. Como demonstrado anteriormente, a TDAL é tanto maior quanto mais elevada for a taxa de secagem. Uma correlação linear entre temperatura e taxa de secagem, no intervalo entre 60 e 180°C, foi encontrada em estudos anteriores para madeira de *Pinus elliottii* (SANTINI, 1980). HERZBERG et al. (1985) também constataram que os valores de TDAL são maiores para altas do que para baixas temperaturas de secagem.

A variação da temperatura do bulbo seco, ao longo da largura da pilha de madeira, para quatro estágios de teor de umidade e velocidade do ar de 2,3 m/s, é mostrada na Figura 32. Os perfis de queda de temperatura, muito semelhantes àqueles apresentados por TAYLOR & LANDOCH (1990), foram obtidos através da média de 10 leituras de cada um dos sensores posicionados na pilha de madeira, na entrada e saída de ar, e a 1/4, a 1/2, e 3/4 da sua largura, para o programa de 110°C.

A curva confeccionada no final da secagem, quando o teor de umidade da madeira atingiu o valor de 10%, mostra na entrada da pilha uma temperatura de 110,6°C e na saída 105,6°C, resultando num TDAL de 5,0°C, que é considerado ainda um valor alto. Entretanto, seria esperado uma redução desse valor a medida que o teor de umidade da madeira diminuisse, a índices inferiores aos alcançados neste estudo. Para os programas de temperaturas mais baixas, houve sobreposição das curvas, gerando uma relação confusa entre a queda da temperatura e os estágios de umidade.

FIGURA 32 - CURVAS TÍPICAS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NUMA PILHA DE MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII*, COM 150 CM DE LARGURA, PARA 4 ESTÁGIOS DE TEOR DE UMIDADE, SECAGEM A ALTA TEMPERATURA (110°C) E VELOCIDADE DO AR DE 2,3 M/S.



4.3.2. Temperatura da madeira

As pesquisas sobre o emprego da temperatura da madeira como alternativa de controle do processo de secagem, discutem com frequência o local onde a mesma deve ser medida. Algumas utilizaram a temperatura superficial, outros a temperatura no centro da peça, e outros ambas. Além dessas, alguns modelos incluíram a temperatura do bulbo seco e a diferença entre as temperaturas de bulbo seco e do centro da peça de madeira. No presente estudo, a temperatura interna da madeira de *Pinus elliottii* foi medida a ¼ de sua espessura, porque nos testes preliminares os valores coletados neste local se correlacionaram melhor com a umidade da madeira.

4.3.2.1. Influência do teor de umidade na temperatura da madeira.

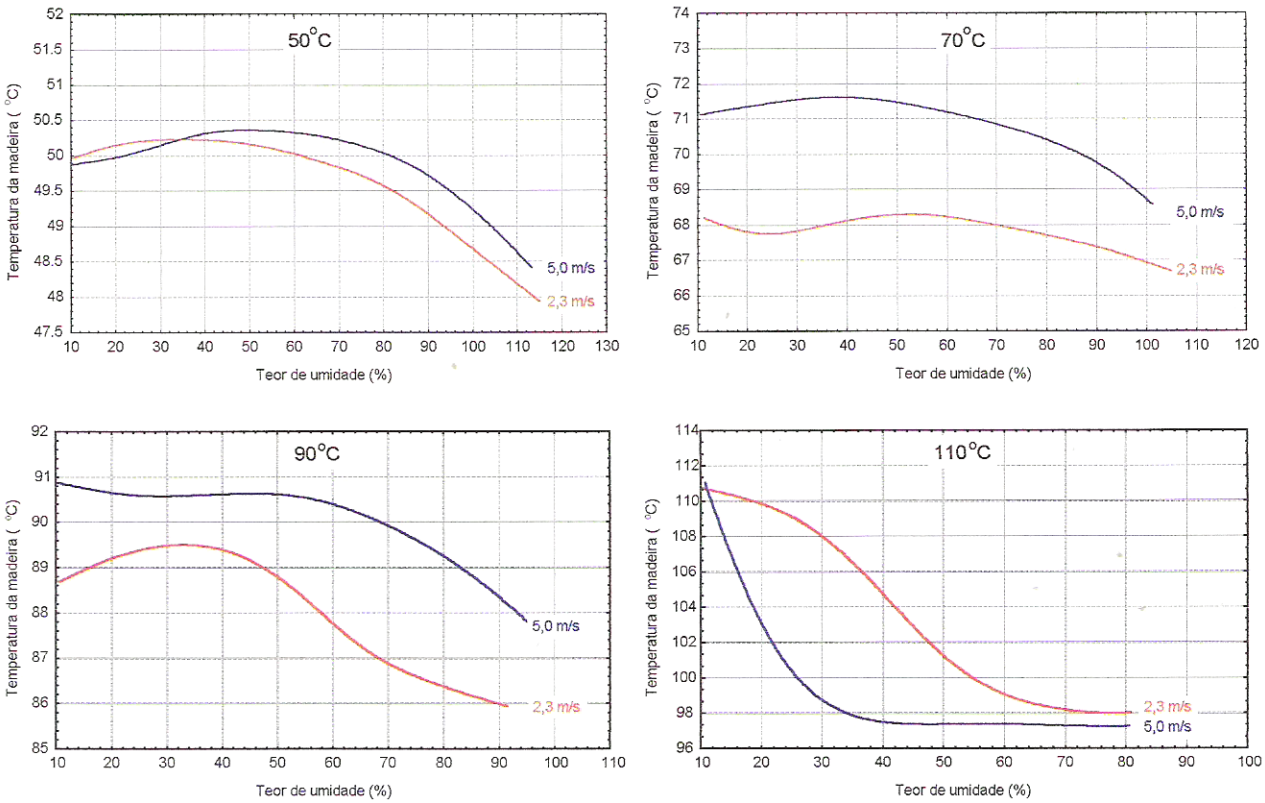
Segundo PANOW & NESTER (1984), a relação entre o teor de umidade e a temperatura da madeira depende da temperatura do bulbo seco, da espécie de madeira, da velocidade do ar e da capacidade de aquecimento da estufa, ou seja, do tempo requerido para atingir a temperatura de secagem desejada. Eles acreditam que o monitoramento da temperatura interna proporciona um método mais simples para determinação do final da secagem, que o uso de relações mais sofisticadas que incluem temperatura, resistência elétrica e teor de umidade.

Na relação entre estas duas variáveis, de uma maneira geral, observa-se que a temperatura interna da madeira aumentou a medida que o teor de umidade diminuiu, como ilustra a Figura 33. As curvas apresentadas na Figura 33, contudo, mostram um comportamento pouco definido nos últimos estágios da secagem, para os processos a baixa temperatura e convencional, ora indicando um aumento (90°C), ora um decréscimo da temperatura da madeira (50 e 70°C). A causa dessas oscilações provavelmente está associada a uma queda momentânea, observada na temperatura interna da madeira, ocorrida durante a abertura das janelas de ventilação por ocasião das mudanças de fase do programa de secagem. PANOW & NESTER (1984) também detectaram quedas entre 1 e 2°C na temperatura interna, geralmente associadas a um súbito aumento da temperatura superficial. Atribuíram o fato, ou a causas reais, ou de algum modo associado aos furos para colocação dos sensores na madeira, ou ainda a um aumento da taxa de secagem próximo ao centro, a medida que o teor de umidade próximo a superfície cai abaixo do PSF.

No caso da secagem a alta temperatura, a relação entre temperatura da madeira e seu teor de umidade, estabelecida graficamente na Figura 33, mostra que as perspectivas de controle do processo, através do monitoramento da temperatura interna da madeira, são mais favoráveis. A análise gráfica e estatística dos dados, indicam que a temperatura da madeira tende a se igualar à do ambiente (tbs), a medida que o teor de umidade se aproxima de 10%, que é o valor estabelecido para a finalização do processo. Este fato, por si só, evidencia que a temperatura interna pode ser um indicativo confiável do final do processo, quando madeira de *Pinus elliottii* com 25 mm de espessura é submetida à secagem. Estudos anteriores já haviam sugerido o uso da temperatura interna da madeira, como alternativa de determinação do teor de umidade durante a secagem a alta temperatura (KEYLWERTH et al., 1955; PANOW &

NESTER, 1984; TOMASELLI, 1977), porém, até o presente, esta variável não foi utilizada em nenhum sistema de controle.

FIGURA 33 - RELAÇÃO ENTRE TEOR DE UMIDADE E TEMPERATURA DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII*, MEDIDA A ¼ DA ESPESSURA, PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR



Os modelos polinomiais apresentados na Tabela 10, obtidos para as quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar, na faixa de umidade desde verde até 10%, confirmam a discussão acima. Para as temperaturas de 50, 70 e 90°C, coeficientes de determinação (R^2) entre 0,39 e 0,87 evidenciam que os modelos não se ajustaram satisfatoriamente aos dados. Entretanto, bons coeficientes de correlação (R) entre temperatura da madeira e teor de umidade foram detectados para a temperatura de 90°C (0,93 na baixa e 0,92 na alta velocidade de ar) e para a temperatura de 50°C (0,94 na velocidade de ar de 2,3 m/s).

TABELA 10 - CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DA MADEIRA E TEOR DE UMIDADE PARA A FAIXA DE UMIDADE DESDE VERDE ATÉ 10% E EQUAÇÕES RESULTANTES

TS	V	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	N	R^2	Syx	F
50	2,3	$Tm = 49,72971 + 0,027774tu - 0,00038tu^2$	2978	0,876	0,2224	10533**
50	5,0	$Tm = 49,72458 + 0,008574tu - 0,000269tu^2 - 0,000004tu^3$	3160	0,648	0,2950	1939,5**
70	2,3	$Tm = 68,09093 + 0,019452tu - 0,000738tu^2 - 0,000007tu^3$	2275	0,396	0,4756	496,0**
70	5,0	$Tm = 70,70680 + 0,045683tu - 0,000618tu^2$	1724	0,654	0,4156	1624,8**
90	2,3	$Tm = 85,85325 + 0,296250tu - 0,006697tu^2 + 0,000038tu^3$	2021	0,863	0,4930	4233,8**
90	5,0	$Tm = 91,31299 - 0,060822tu + 0,001661tu^2 - 0,000015tu^3$	1281	0,856	0,2997	2535,3**
110	2,3	$Tm = 100,1824 + 1,371953tu - 0,056358tu^2 + 0,000753tu^3 - 0,000003tu^4$	719	0,990	0,5428	17171**
110	5,0	$Tm = 135,6769 - 2,97640tu + 0,0843tu^2 - 0,0010tu^3 + 0,000004488tu^4$	389	0,981	0,5517	5085,8**

onde: TS = temperatura de secagem(°C); V = velocidade do ar (m/s); N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; Tm = temperatura da madeira; tu = teor de umidade.

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Para a secagem a alta temperatura (110°C), onde se acredita que a temperatura da madeira seja uma ferramenta utilizável como meio de controle do processo, encontrou-se uma correlação mais estreita entre esta e o teor de umidade. Modelos polinomiais de quarto grau se ajustaram melhor aos dados analisados, como atestam os coeficientes de determinação (R^2) das equações obtidas para a velocidade de 2,3 m/s (0,99) e 5,0 m/s (0,98). As equações resultantes da análise da regressão, bem como as estimativas dos parâmetros que as qualificam, são apresentados na Tabela 10, ao passo que a análise da variância encontra-se na Tabela A7 dos anexos.

A maioria das pesquisas conduzidas sobre o assunto utilizaram o processo a alta temperatura, embora VERMAAS & NEVILLE (1988) também tenham encontrado relacionamento entre as duas variáveis na secagem a baixa temperatura. Neste último, a mudança na temperatura interna em função da percentagem de alteração no teor de umidade da madeira, é menor que na secagem a alta temperatura, o que, segundo os mesmos pesquisadores, requer o uso de sensores mais precisos e mais protegidos contra a condução de calor na madeira. Esta, provavelmente, seja a explicação para a opção dos pesquisadores pelo processo a alta temperatura, e a razão da boa correlação entre temperatura da madeira e teor de umidade, anteriormente discutida.

De acordo com KOTOK et al. (1969), abaixo do ponto de saturação das fibras, quando a água é evaporada da superfície, o calor de vaporização produz um resfriamento na madeira. Como algumas curvas de temperatura da madeira em função do teor de umidade apresentaram uma tendência decrescente a partir do PSFt, confeccionou-se novos modelos para o intervalo de umidade entre este ponto e 10%. As equações de regressão e as estimativas dos parâmetros apresentadas na Tabela 11, indicam que houve uma boa correlação entre a temperatura da madeira e o teor de umidade, apenas para o programa de 110°C. Os coeficientes de correlação (R) de 0,88 e 0,99 encontrados para a baixa e a alta velocidade de ar, respectivamente, evidenciam a existência de uma boa correlação entre as variáveis, na faixa de umidade considerada. Modelos polinomiais de terceiro grau foram os que melhor se ajustaram aos dados, como mostram os coeficientes de determinação (R^2) de 0,77 e 0,97, obtidos para a velocidade de ar de 2,3 m/s e 5,0 m/s, respectivamente (Tabela 11). Para as temperaturas de 50, 70 e 90°C, a correlação entre as duas variáveis no intervalo de umidade, entre o PSFt e 10%, e o ajuste do modelo aos dados, foram baixos e insignificantes. Este fato reforça as

TABELA 11 - CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DA MADEIRA E TEOR DE UMIDADE NO INTERVALO ENTRE O PSFt E 10% E EQUAÇÕES RESULTANTES.

TS	V	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	N	R^2	Syx	F
50	2,3	$Tm = 52,76127-0,49165tu+0,02745tu^2-0,00046tu^3$	770	0,333	0,2139	127,51
50	5,0	$Tm = 33,86798+2,27918tu-0,14006tu^2+0,00263tu^3$	777	0,353	1,2593	140,60
70	2,3	$Tm = 69,19575-0,29074tu+0,01486tu^2-0,00025tu^3$	488	0,098	0,4413	17,49
70	5,0	$Tm = 71,79599-0,08697tu+0,00477tu^2-0,00009tu^3$	503	0,033	0,5060	0,48
90	2,3	$Tm = 105,4237-2,7781tu+0,1487tu^2-0,00250tu^3$	342	0,295	0,6001	47,27
90	5,0	$Tm = 88,85977+0,3978tu-0,0235tu^2+0,00040tu^3$	281	0,207	0,4505	24,09
110	2,3	$Tm = 116,2318-0,8891tu+0,0442tu^2-0,00080tu^3$	239	0,773	0,3873	266,90**
110	5,0	$Tm = 124,9278-1,1976tu-0,0094tu^2+0,00070tu^3$	149	0,977	0,6804	2060,80**

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; Tm = temperatura da madeira (°C); tu = teor de umidade da madeira (%); PSFt = ponto de saturação das fibras teórico

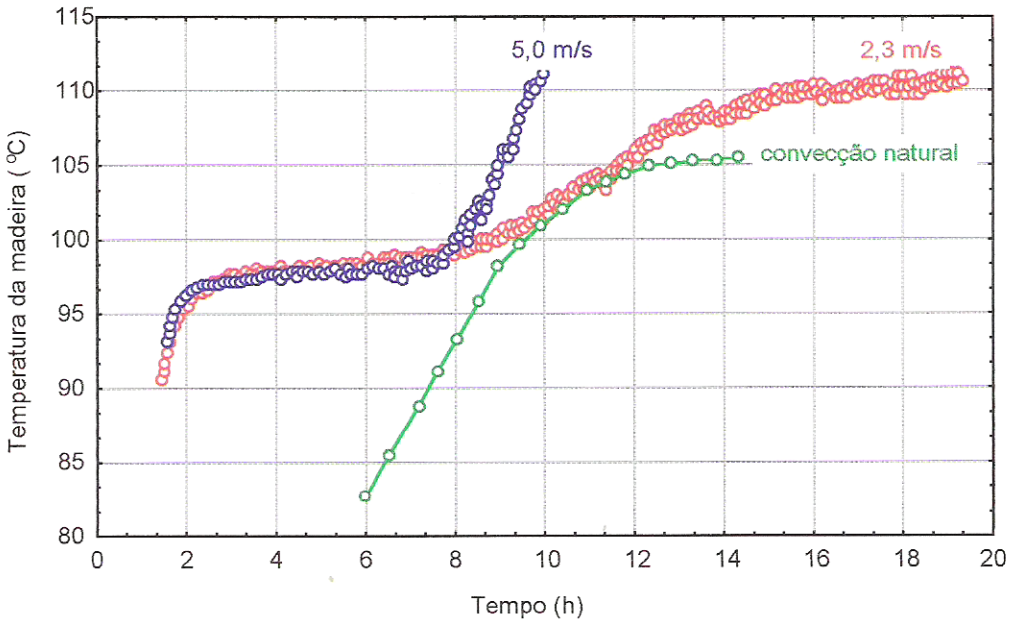
** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

evidências de estudos anteriores, em que somente nos processos de secagem a alta temperatura boas foram obtidas correlações entre a temperatura da madeira e o teor de umidade.

A variação da temperatura interna da madeira durante a secagem a alta temperatura, a partir do estado verde, foi analisada por HANN (1965), citado por TOMASELLI (1977). O trabalho citado constatou que num período inicial, a temperatura a ½ da espessura aumenta até 100°C, onde permanece constante durante um determinado tempo, e posteriormente tem um período crescente até atingir a temperatura de secagem (tbs). De acordo com TOMASELLI (1977), o tempo de cada período depende da temperatura, do tipo de madeira (cerne ou alburno, lenho juvenil ou adulto), da espécie, do teor de umidade inicial, do meio de secagem (vapor, ar, etc.) e da distância da superfície. O período de temperatura constante ocorre porque a presença de água capilar não permite que a temperatura interna da madeira aumente significativamente acima de 100°C, e se manifesta neste ponto quando não se forma pressão dentro da estrutura da madeira (TOMASELLI, 1977). Segundo PANOW & NESTER (1984), a medida que a temperatura aumenta acima de certos níveis, a taxa de saída de vapor não consegue igualar-se à taxa de aquecimento, o que favorece a formação de pressão dentro da madeira.

Na secagem a 110°C, a temperatura interna da madeira apresentou um comportamento muito semelhante àquele observado por HANN (1965), com a diferença que a temperatura constante durante o segundo período, medida a ¼ da espessura, oscilou entre 97 e 99°C nas duas velocidades de ar utilizadas, como mostra a Figura 34. As curvas da temperatura medida a ¼ da espessura da madeira, foram similares àquela obtida por TOMASELLI (1977), próximo a superfície da madeira de *Pinus radiata* de 50 mm. As temperaturas de 50, 70 e 90°C da estufa piloto, bem como as quatro temperaturas dos testes preliminares, não mostraram o mesmo comportamento, nem foi observado o período de temperatura constante característico do processo alta temperatura. A curva da temperatura interna obtida para o processo de 110°C na estufa de convecção natural, foi incluída na Figura 34, apenas por razões práticas, pois será discutida posteriormente.

FIGURA 34 - VARIAÇÃO NA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII*, MEDIDA A ¼ DA ESPESSURA DE 25 MM, DURANTE A SECAGEM A 110°C COM E SEM CIRCULAÇÃO DE AR



4.3.2.2. Influência da velocidade do ar na relação temperatura da madeira/teor de umidade

A influência da velocidade do ar na temperatura da madeira, baseia-se no fato que o emprego de valores elevados resultam num aumento da transferência de calor para a madeira, aumentando sua temperatura (SALAMON, 1969). Este fato foi observado nos processos de 50, 70 e 90°C, onde a velocidade de 5,0 m/s manteve a temperatura da madeira mais elevada do que a velocidade de 2,3 m/s durante a maior parte da secagem, como mostra a Figura 33. Abaixo do PSFt observou-se uma tendência de queda na temperatura da madeira nos três processos, provocada pelo calor de vaporização, conforme discutido anteriormente.

Na secagem a alta temperatura, as curvas da temperatura interna em função do teor de umidade, com relação a velocidade de ar utilizada, apresentaram um comportamento diverso daquele verificado nos demais processos. A temperatura interna da madeira, submetida a uma velocidade de ar de 5,0 m/s, manteve-se sempre abaixo daquela observada para 2,3 m/s, até o final da secagem, quando praticamente se igualaram (Figura 33). Embora a transferência de calor para a madeira ocorra mais rapidamente quando se utiliza velocidades de ar mais altas,

constatou-se no presente estudo, que o aumento na taxa de secagem não foi acompanhado por aumento da temperatura interna da madeira, com relação ao seu teor de umidade. Este comportamento das curvas pode estar relacionado com a formação de gradientes lineares, não parabólicos, típicos de processos de secagem a alta temperatura. Por outro lado, analisando-se a temperatura da madeira em função do tempo de secagem, observou-se que a mesma foi mantida praticamente igual nas duas velocidades de ar, durante grande parte do período de secagem (Figura 34). Entretanto, a partir de um determinado momento, que no caso da velocidade de 5,0 m/s corresponde ao PSFt, a temperatura interna da madeira submetida a alta velocidade aumentou rapidamente, até atingir a temperatura do bulbo seco no final da secagem. Já o aumento da temperatura interna sob a velocidade de 2,3 m/s, também com relação ao tempo, a partir do ponto acima mencionado, ocorreu de forma gradual e ligeiramente decrescente até atingir o teor de umidade final de 10%, como mostra a Figura 34.

O estudo da distribuição da temperatura interna da madeira realizado por HANN (1965), conduzido num equipamento especialmente construído, sem qualquer movimento de ar, a não ser por convecção (TOMASELLI, 1977), parece mostrar uma configuração similar a encontrada neste experimento, para a temperatura de 110°C. É importante ressaltar que as curvas confeccionadas por HANN (1965) não relacionam a temperatura interna com o teor de umidade, e sim com o tempo de secagem.

A temperatura do bulbo úmido também pode introduzir mudanças nos padrões de temperatura, principalmente porque a transferência de calor para a superfície da madeira torna-se maior a medida que aumenta a umidade do ar (SALAMON, 1969). O efeito desta variável foi mais marcante nos processos de secagem convencional (70 e 90°C) e baixa temperatura (50°C), onde os valores da temperatura do bulbo úmido programados foram atingidos e mantidos dentro dos níveis desejáveis. Esta, provavelmente, seja a explicação para a obtenção de temperaturas internas mais elevadas nesses processos, quando a velocidade do ar de 5,0 m/s foi utilizada. Por outro lado, nos processos de secagem a temperaturas superiores a 100°C, a temperatura do bulbo úmido (tbu) dificilmente alcança este patamar (SIMPSON & ROSEN, 1981) e a influência da umidade do ar na transferência de calor torna-se menos importante. Segundo esses autores isto ocorre porque a pressão parcial de vapor máxima possível nesta situação é igual a uma atmosfera, e a pressão de vapor saturado acima do ponto de ebulição da água é maior do que uma atmosfera. É interessante observar, a título de informação, que os maiores valores de tbu registrados para o programa de 110°C oscilaram em torno de 95°C para

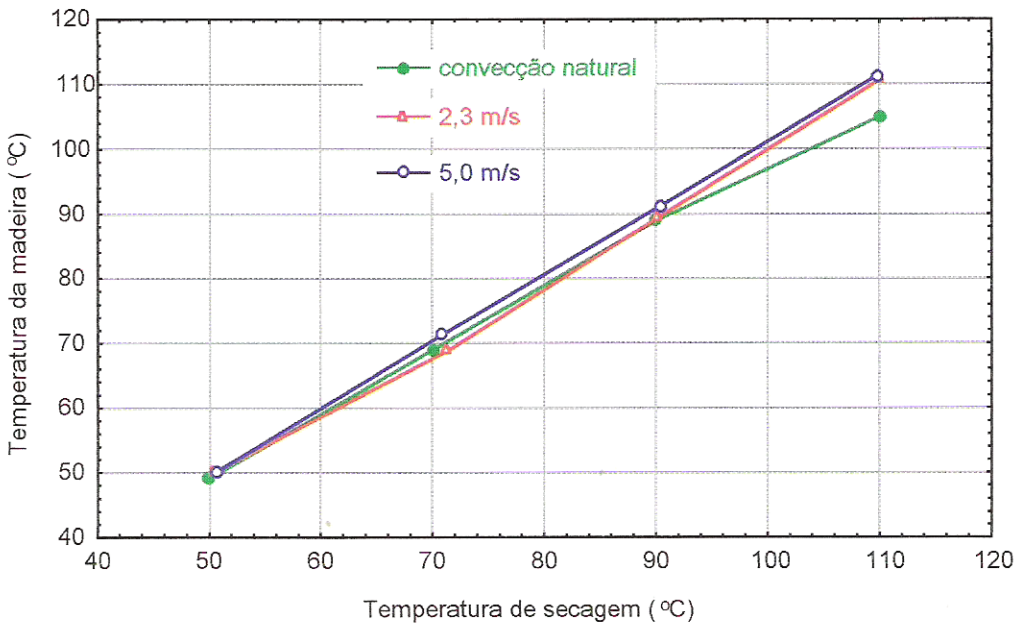
a primeira fase do programa (teor de umidade superior a 70%), quando a temperatura requerida no termômetro úmido era 99,4°C (Tabela 4). Uma regra geralmente aceita, considera que, quando temperaturas de secagem superiores a ±120°C são utilizadas, a temperatura do bulbo úmido não precisa ser controlada (VERMAAS, 1987).

A Figura 34 permite também uma comparação do efeito da velocidade do ar sobre a temperatura interna da madeira, confrontando-se os testes preliminares e experimento principal, desde o momento que a estufa atingiu 110°C até o material alcançar o teor de umidade de 10%. Deve-se salientar que a metodologia de determinação do teor de umidade foi semelhante nas duas fases experimentais, com a diferença que nos testes preliminares o peso foi medido manual e esporadicamente, em apenas uma peça de madeira, enquanto que no experimento principal, o valor foi calculado pelo software a cada minuto, para toda a carga de madeira. Nos dois experimentos, a temperatura interna foi obtida a ¼ da espessura de uma única peça de madeira.

Comparando com o experimento principal, em que foi utilizada circulação forçada de ar, a temperatura interna da madeira, submetida a secagem de 110°C em estufa de laboratório, aumentou de forma mais lenta e gradual, fato esperado em função da menor transferência de calor para a madeira. A temperatura máxima da madeira, alcançada no final da secagem em estufa de convecção natural, quando o teor de umidade atingiu 10%, foi 105°C (Figura 34).

O efeito da velocidade do ar na relação entre a temperatura de secagem e a temperatura da madeira, é ilustrado na Figura 35. Os valores da temperatura interna foram calculados através da média aritmética das dez últimas observações registradas no final da secagem, quando a madeira atingiu o teor de umidade de 10%. Apesar dos valores estarem muito próximos, verificou-se que a temperatura interna no final do processo foi mais elevada na velocidade de 5,0 m/s, que na de 2,3 m/s, para as quatro temperaturas utilizadas, sendo que as maiores diferenças ocorreram para as temperaturas de 70 e 90°C (2,5 e 1,8°C, respectivamente). Além disso, com velocidade de ar de 5,0 m/s, observou-se um aumento praticamente linear da temperatura da madeira em função da temperatura de bulbo seco, no final dos quatro processos de secagem. Já nos testes preliminares, conduzidos em estufas de laboratório com movimentação de ar por convecção natural, a temperatura interna da madeira apresentou uma tendência decrescente com o aumento da temperatura de secagem, e uma diferença crescente de temperatura em comparação com a maior velocidade de ar utilizada.

FIGURA 35 - EFEITO DA VELOCIDADE DO AR NA RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DE SECAGEM E DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII*, MEDIDA A ¼ DA ESPESSURA (MÉDIA DAS ÚLTIMAS DEZ OBSERVAÇÕES)



Analisando a influência da velocidade do ar na temperatura interna da madeira, os seguintes aspectos podem ser observados:

a) um aumento na velocidade do ar produziu um substancial aumento na temperatura da madeira para os processos de secagem convencional (70 e 90°C) e baixa temperatura (50°C), quando a temperatura interna foi relacionada com o teor de umidade. Este comportamento não se repetiu para a secagem a alta temperatura (110°C), provalvelmente devido a formação de gradientes lineares, não parabólicos, típicos desses processos;

b) nos testes preliminares, conduzidos em estufa de convecção natural, a temperatura interna da madeira se igualou a tbs no final da secagem, apenas nos processos de 50, 70 e 90°C. Na secagem a 110°C, a temperatura interna foi inferior a este valor, quando a madeira atingiu 10% de umidade. Entretanto, o tempo de permanência da madeira em secagem neste processo foi, respectivamente, 2, 3 e 5 vezes menor que nas temperaturas de 90, 70 e 50°C.

As observações apresentadas acima, apoiadas no trabalho de HANN (1965), citado por TOMASELLI (1977), que relacionou a temperatura da madeira com o período de tempo, sugerem que o tempo de permanência em secagem, provavelmente exerceu uma maior

influência sobre a temperatura interna da madeira que o seu teor de umidade, e o uso de maiores velocidade do ar e temperatura de secagem contribuem para sua redução.

A discussão a respeito dos parâmetros envolvidos no relacionamento entre temperatura da madeira e teor de umidade, tem como principal objetivo a obtenção de informações que possam viabilizar o emprego da primeira como meio alternativo de controle do processo de secagem. Com base na análise dos resultados aqui relatados, e das principais pesquisas conduzidas sobre o assunto, pode-se destacar alguns pontos importantes:

a) A existência de uma estreita relação entre a temperatura da madeira e o seu teor de umidade é definitiva. Constatada a mais de 40 anos por KEYLWERTH et al. (1955) e evidenciada posteriormente por vários pesquisadores, foi confirmada experimentalmente no presente estudo, com madeira de *Pinus elliottii*, especialmente no processo de secagem a alta temperatura. A análise dos dados apresentada nas Tabelas 10 e 11 possibilita a confirmação estatística do relacionamento entre as duas variáveis, para as duas amplitudes de teor de umidade em que foram avaliadas. Os modelos de regressão se ajustaram melhor aos dados na temperatura de 110°C, onde também foram obtidos os maiores coeficientes de correlação entre a temperatura da madeira e o teor de umidade. A análise dos resíduos, contudo, sugere cuidados com relação a confiabilidade dos modelos;

b) Uma questão que parece ainda indefinida diz respeito ao local de medição da temperatura, devido aos gradientes de umidade e temperatura, formados principalmente quando temperaturas superiores a 100°C são utilizadas. A opção pela medição a ¼ da espessura é apoiada na suposição que o teor de umidade a esta profundidade corresponde ao valor médio para a seção transversal da madeira (MACKAY, 1976b; JAMES, 1984; WENGERT, 1992), e nos testes preliminares conduzidos nas estufas de convecção natural;

c) O emprego da temperatura interna associada a outra variável, como meio estimativo do teor de umidade ou indicativo do final do processo de secagem, também é discutido na literatura. Para KEYLWERTH, 1952, o final da secagem ocorre quando as temperaturas superficial e interna se igualam. A diferença entre a temperatura de bulbo seco e a temperatura interna da madeira, geralmente incluída em modelos matemáticos, em que o teor de umidade é a variável dependente (PANOW & NESTER, 1985; VERMAAS & NEVILLE, 1988; JAI & HSIUNG, 1996), também se apresenta como promissora. Segundo JAI & HSIUNG (1996), o uso desta diferença de temperatura é exeqüível como estimadora do teor de umidade final, exceto em espécies susceptíveis a severas rachaduras internas. Acrescenta-se a essas, a relação entre

temperatura interna e temperatura de bulbo úmido, avaliada no presente estudo e apresentada mais adiante;

d) Nos processos de secagem convencional ou baixa temperatura, a relação temperatura interna versus teor de umidade apresenta uma certa instabilidade, tanto em baixas como em altas velocidades de ar. A explicação para o fato, provavelmente, está relacionada com a pequena alteração na temperatura interna, em função da percentagem de alteração no teor de umidade da madeira, o que, segundo VERMAAS & NEVILLE (1988), requer o uso de sensores mais precisos e que reflitam melhor a temperatura da madeira.

4.3.3. Coeficiente temperatura da madeira/temperatura do bulbo úmido (TM/TBU)

A denominação acima é aplicada a um coeficiente calculado através da razão entre a temperatura medida a ¼ da espessura da madeira, obtida conforme metodologia já descrita, e a temperatura do termômetro úmido (tbu) apresentada nos programas estabelecidos para as quatro temperaturas de secagem utilizadas. As duas variáveis foram monitoradas continuamente durante o processo, sendo seus valores coletados em intervalos de 80 segundos, aproximadamente.

KEYLWERTH (1952), citado por VERMAAS (1987), postula que no processo de secagem a alta temperatura, a temperatura interna da madeira se aproxima da temperatura do bulbo úmido, desde que o seu teor de umidade seja superior ao PSF. Quando o teor de umidade superficial cai abaixo deste ponto, o aumento da temperatura superficial é seguido de um acréscimo na temperatura interna, devido ao elevado gradiente entre a superfície e o centro da madeira. Somente quando o teor de umidade no centro da madeira cai abaixo do PSF, haverá um grande aumento na temperatura interna (VERMAAS, 1987). Essas informações conduzem às seguintes conclusões:

a) Por ocasião da secagem de madeira verde, quando o teor de umidade encontra-se acima do ponto de saturação das fibras, a relação entre as temperaturas da madeira e bulbo úmido se mantém próximo à unidade. Nesse estágio de secagem, a presença de água capilar não permite que a temperatura interna da madeira aumente significativamente acima de 100°C, nos processos a alta temperatura (KOTOK et al., 1969; TOMASELLI, 1977), e a redução na temperatura do bulbo úmido é pequena; e

b) Quando o teor de umidade no centro da madeira cai abaixo do PSF, o valor da relação torna-se superior à unidade, porque a temperatura interna tende a aumentar substancialmente (VERMAAS, 1987), ao passo que a temperatura do bulbo úmido precisa ser reduzida para favorecer a secagem da madeira.

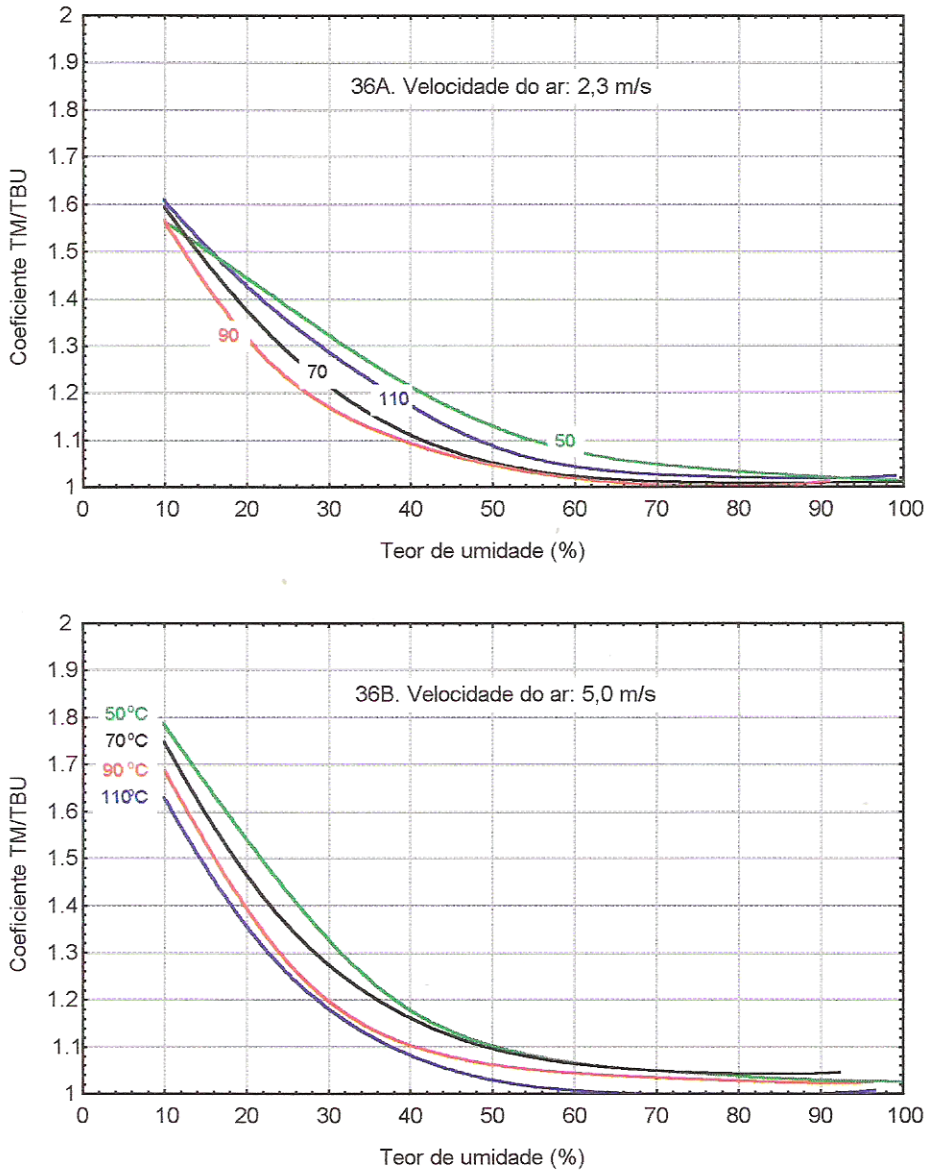
Com base nessas observações, estabeleceu-se no presente estudo a relação temperatura da madeira/temperatura do bulbo úmido (coeficiente TM/TBU), com dois objetivos principais:
a) reduzir o efeito negativo que a temperatura do bulbo úmido exerce sobre a temperatura da madeira, principalmente por ocasião da abertura das janelas de ventilação. Isto ocorreu porque o sistema de controle não proporcional da estufa produziu instabilidade no processo de secagem, conforme relatado anteriormente, pois a entrada de ar na câmara provocou uma queda momentânea na temperatura da madeira; e
b) estabelecer uma correlação entre o coeficiente TM/TBU e o teor de umidade, visando o emprego dessa relação na estimativa da umidade da madeira ou como meio de previsão do final da secagem.

A relação gráfica entre o coeficiente TM/TBU e o teor de umidade da madeira obtido durante o período de secagem, desde verde até 10%, para as quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar, é apresentada na Figura 36. Observa-se que, para os quatro programas de temperatura e duas velocidades de ar, o coeficiente TM/TBU aumenta com a diminuição do teor de umidade.

As curvas resultantes dessa relação parecem confirmar os estudos de KEYLWERTH (1952), pois o coeficiente TM/TBU, no início da secagem, se mantém próximo à unidade, principalmente nos processos que utilizaram maior velocidade de ar (Figura 36B). A medida que diminui o teor de umidade da madeira, mesmo acima do PSF, verificou-se que o coeficiente assume valores superiores a unidade, resultante da redução na temperatura do bulbo úmido e não do aumento da temperatura da madeira.

O efeito da temperatura de secagem e da velocidade do ar sobre o coeficiente TM/TBU pode ser avaliado pelas Figuras 36 e 37. No final da secagem, encontrou-se valores de coeficiente TM/TBU menores a medida que temperaturas de secagem mais altas foram empregadas. Essa tendência foi mais evidente para a velocidade de ar de 5,0 m/s que para a de 2,3 m/s (Figura 36), e pode ser atribuída ao programa de secagem utilizado.

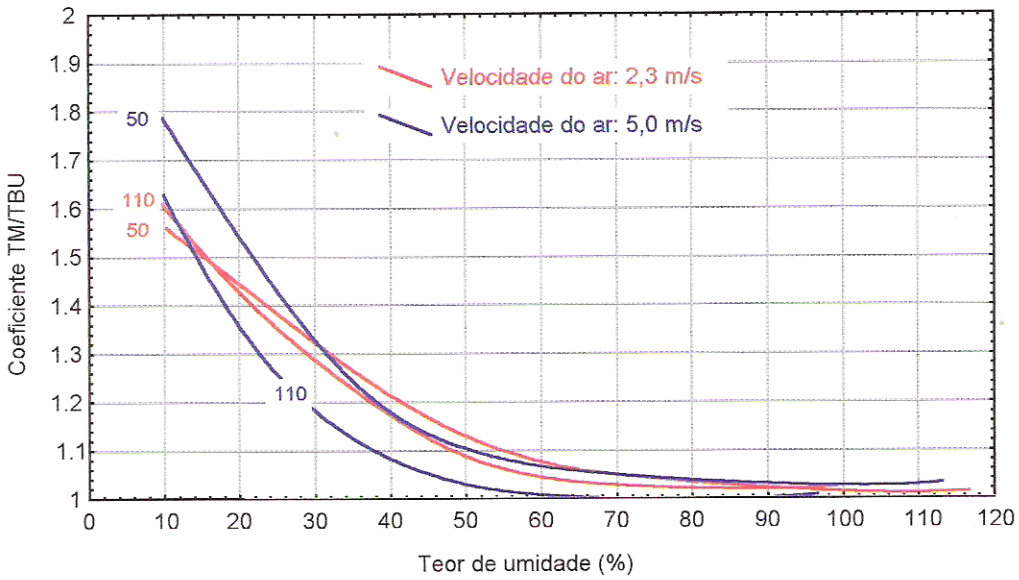
FIGURA 36 - COEFICIENTE TM/TBU EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA *PINUS ELLIOTTII*, PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR



As curvas apresentadas na Figura 37, que ilustram o efeito da temperatura e da velocidade do ar sobre o coeficiente TM/TBU, mostram um comportamento muito semelhante entre as temperaturas de 50 e 110°C, dentro de cada um dos programas de velocidade de ar. Quando a velocidade de 2,3 m/s foi utilizada, o coeficiente TM/TBU para as temperaturas de 50 e 110°C foi muito próximo no final da secagem (1,50 e 1,57, respectivamente). Entretanto, para a velocidade de 5,0 m/s, encontrou-se no final do processo, um valor maior para a

temperatura de 50°C (1,68) que para a de 110°C (1,60), sendo que a diferença entre elas manteve-se praticamente invariável na faixa entre aproximadamente 30 e 10% de umidade. Com referência a isso, VERMAAS (1987) relata que a influência da velocidade do ar sobre a taxa de secagem diminui a medida que decresce a temperatura do bulbo úmido. Esses resultados evidenciam que, para baixas velocidades de ar, a influência da temperatura de secagem no coeficiente TM/TBU foi negligenciável, ao passo que na alta velocidade, temperaturas mais elevadas produziram valores menores.

FIGURA 37 - COEFICIENTE TM/TBU EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE PARA DUAS TEMPERATURAS DE SECAGEM (50 E 110°C) E DUAS VELOCIDADES DE AR (2,3 E 5,0 M/S)



Os resultados da análise da regressão entre o coeficiente TM/TBU e o teor de umidade da madeira para as quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar, no intervalo de umidade desde o estado verde até 10%, são apresentados na Tabela 12. Coeficientes de correlação entre 0,97 e 0,99 para as temperaturas de 70 e 110°C, respectivamente, baixos valores de erro padrão da estimativa e altos valores de F evidenciam a existência de uma boa correlação entre as duas variáveis em todos os processos de secagem. Os altos coeficientes de determinação, mostrados na Tabela 12, juntamente com as estimativas dos parâmetros e a análise dos resíduos, são indicativos que os modelos polinomiais de terceiro grau se ajustaram muito bem ao conjunto de dados. A análise da variância da regressão polinomial para os quatro

TABELA 12 - CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE TM/TBU E TEOR DE UMIDADE PARA A FAIXA DESDE VERDE ATÉ 10% DE UMIDADE E EQUAÇÕES RESULTANTES

TS	V	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	N	R^2	Syx	F
50	2,3	$y = 1,79207 - 0,021369tu + 0,000196tu^2 - 0,000001tu^3$	3027	0,973	0,0299	36374**
50	5,0	$y = 2,22005 - 0,045093tu + 0,000574tu^2 - 0,000002tu^3$	3155	0,959	0,0472	24861**
70	2,3	$y = 1,93076 - 0,036687tu + 0,000477tu^3 - 0,000002tu^3$	2744	0,943	0,0332	15276**
70	5,0	$y = 2,14059 - 0,045718tu + 0,000646tu^2 - 0,000003tu^3$	1770	0,953	0,0447	11933**
90	2,3	$y = 1,87316 - 0,037712tu + 0,000558tu^2 - 0,0000028tu^3$	2036	0,950	0,0266	12918**
90	5,0	$y = 1,88061 - 0,038159tu + 0,000576tu^2 - 0,0000029tu^3$	1307	0,945	0,0290	7498,6**
110	2,3	$y = 1,86934 - 0,027835tu + 0,000302tu^2 - 0,0000011tu^3$	715	0,981	0,0251	12195**
110	5,0	$y = 2,02801 - 0,046239tu + 0,000692tu^2 - 0,0000034tu^3$	446	0,963	0,0356	3826,7**

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; y = coeficiente TM/TBU; tu = teor de umidade da madeira (%)

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

programas de temperatura e duas velocidades de ar, encontra-se na Tabela 12 dos anexos.

Uma avaliação adicional, através da análise de correlação, do coeficiente TM/TBU em função do teor de umidade, foi realizada na faixa de umidade entre o PSFt (±30%) e 10%, sendo que os resultados são mostrados na Figura 38 e na Tabela 13.

FIGURA 38 - COEFICIENTE TM/TBU EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA FAIXA DE 30 A 10% PARA AS QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR

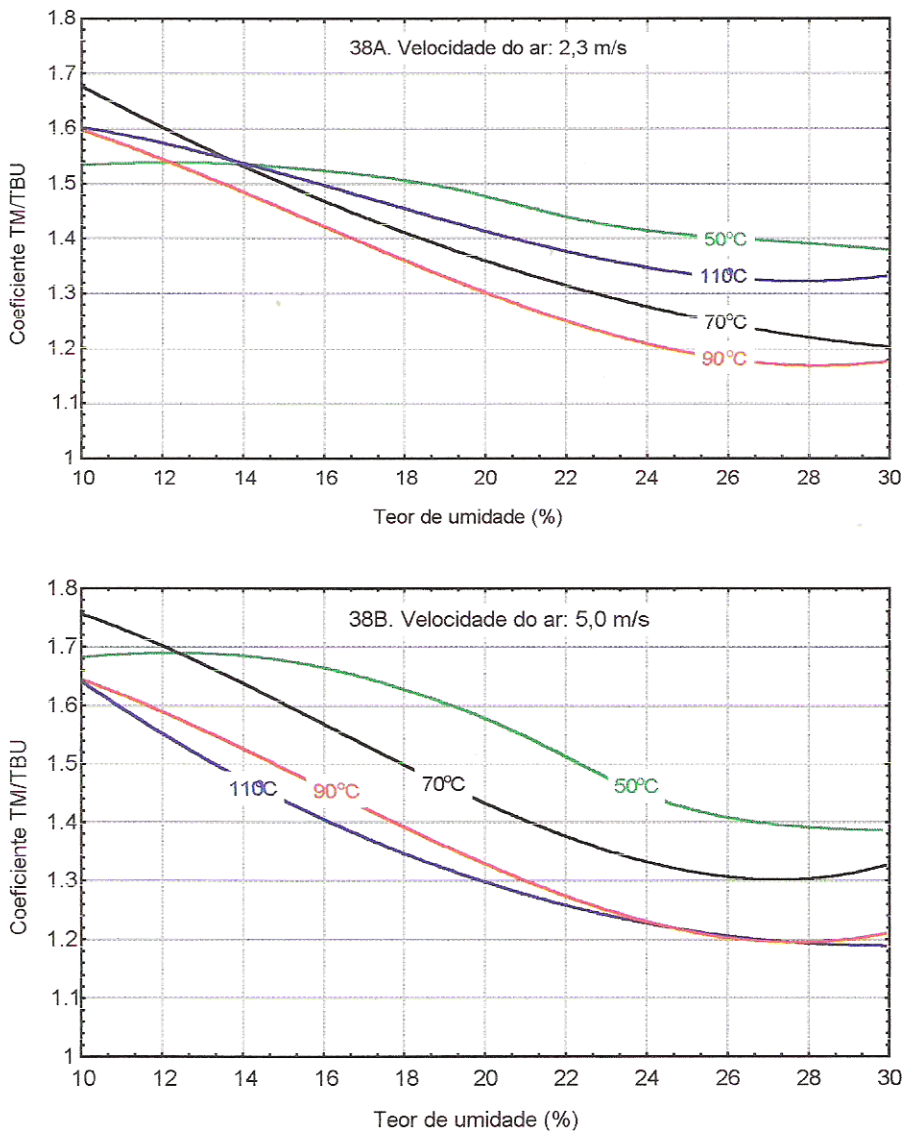


TABELA 13 - CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE TM/TBU E O TEOR DE UMIDADE PARA A FAIXA ENTRE 30 E 10% DE UMIDADE E EQUAÇÕES RESULTANTES

TS	V	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	N	R^2	Syx	F
50	2,3	$y = 0,945031 + 0,097231tu - 0,0051562tu^2 + 0,00008035tu^3$	761	0,843	0,0210	1354,9**
50	5,0	$y = 0,575422 + 0,197955tu - 0,0108253tu^2 + 0,00017065tu^3$	942	0,909	0,0386	3140,7**
70	2,3	$y = 2,131386 - 0,051468tu + 0,0005642tu^2 + 0,00000401tu^3$	473	0,785	0,0673	569,61**
70	5,0	$y = 1,720662 + 0,040899tu - 0,0046952tu^2 + 0,00009654tu^3$	503	0,809	0,0708	706,65**
90	2,3	$y = 1,655356 + 0,019747tu - 0,0032320tu^2 + 0,0000680tu^3$	360	0,871	0,0487	803,09**
90	5,0	$y = 2,251089 - 0,075302tu + 0,0014849tu^2 - 0,00000515tu^3$	268	0,848	0,0524	492,17**
110	2,3	$y = 1,530746 + 0,032549tu - 0,0031501tu^2 + 0,00006153tu^3$	230	0,924	0,0258	919,30**
110	5,0	$y = 1,664527 + 0,029378tu - 0,0039601tu^2 + 0,00008262tu^3$	149	0,896	0,0502	415,58**

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; y = coeficiente TM/TBU; tu = teor de umidade da madeira (%)

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

A análise gráfica das curvas apresentadas na Figura 38 sugere, a exceção da temperatura de 50°C, uma tendência crescente do coeficiente TM/TBU a medida que diminui o teor de umidade da madeira, nas duas velocidades de ar utilizadas, conforme comentado previamente. Este comportamento é esperado, uma vez que nesse estágio de secagem ocorre um grande aumento da temperatura da madeira (VERMAAS, 1987), ao passo que a temperatura do bulbo úmido alcança os valores mais baixos, estabelecidos para o programa de secagem. A Tabela 13 mostra que, embora os coeficientes de determinação calculados tenham sido menores do que aqueles obtidos para o intervalo, desde o estado verde até o final da secagem, os valores encontrados evidenciam um bom ajuste dos modelos de regressão para faixa de umidade em questão. Os valores do coeficiente de correlação para o intervalo desde o PSFt até 10% de umidade, variaram entre 0,87 e 0,96, ao nível de 1% de probabilidade, o que indica a existência de uma boa correlação entre as duas variáveis. A análise da variância da regressão polinomial para os quatro programas de temperatura e duas velocidades de ar, na faixa de umidade acima mencionada, é apresentada na Tabela A9 dos anexos.

Em resumo, o estudo da relação entre o coeficiente TM/TBU e o teor de umidade da madeira nas temperaturas de secagem de 50, 70, 90 e 110°C e velocidades de ar de 2,3 e 5,0 m/s, possibilitou as seguintes observações:

a) O coeficiente TM/TBU aumenta conforme diminui o teor de umidade, apresentando uma relação quantitativa muito próxima daquela indicada na literatura;

b) Foi encontrada uma boa correlação entre as variáveis, no intervalo desde o estado verde até 10% de umidade, e os modelos de regressão polinomiais resultantes se ajustaram bem ao conjunto de dados, fato evidenciado pelas estimativas dos parâmetros e pela análise dos resíduos;

c) O uso de velocidades de ar mais baixas parecem indicar um melhor ajuste dos modelos de regressão, ao passo que velocidades mais elevadas evidenciam um aumento mais acentuado do coeficiente nos estágios finais da secagem, onde os valores foram mais altos para a temperatura de 50°C que para a de 110°C.

4.3.4. Resistência elétrica da madeira

As leituras de resistência elétrica foram obtidas aproximadamente na metade do comprimento da mesma tábua usada para medir a temperatura da madeira. Dois eletrodos

isolados, afastados 25 mm entre si, foram cravados na madeira até uma profundidade correspondente a ¼ da sua espessura. Os pinos foram introduzidos na madeira paralelamente à direção da grã, de forma que a direção de fluxo da corrente fosse paralelo (SKAAR, 1972) e não transversal às fibras (VERMAAS, 1982b), onde a resistividade é duas a três vezes maior do que no sentido longitudinal. A disposição adotada para os eletrodos teve como finalidade evitar a influência de outros fatores, como a do lenho outonal de maior densidade, presente em tábuas de *Pinus elliottii* orientadas radialmente.

Na relação estabelecida entre as duas variáveis, precisa ser considerado que a resistência elétrica foi medida em uma única tábua posicionada no lado de entrada do ar na pilha de madeira, ao passo que o teor de umidade corresponde ao valor médio da carga em secagem. Conforme descrito previamente, o teor de umidade da carga foi calculado a partir da pesagem contínua da mesma, através do uso de uma célula de carga tipo tração.

4.3.4.1. Efeito do teor de umidade da madeira

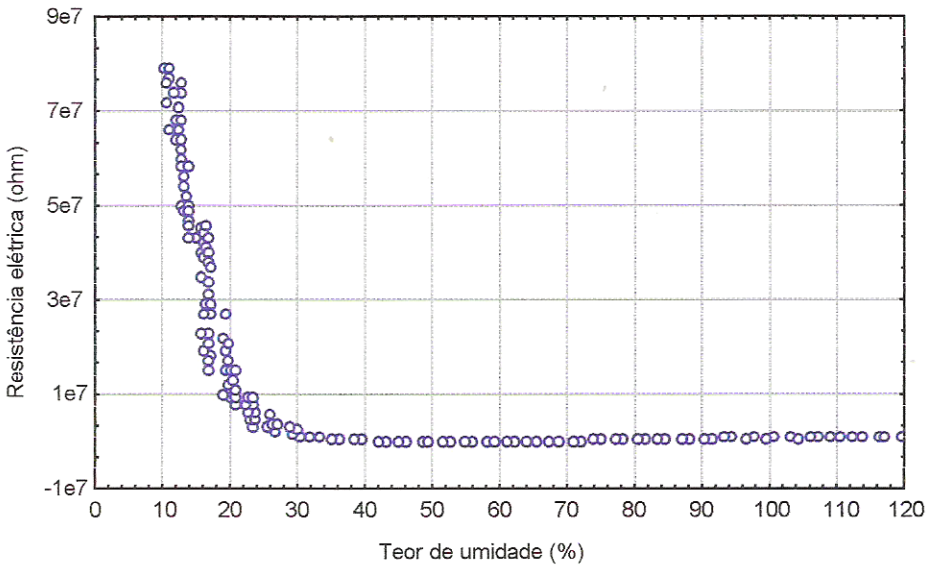
A curva mostrada na Figura 39, confeccionada com os dados obtidos para o programa de 50°C, pode ser considerada uma representação típica da variação da resistência elétrica da madeira em função do teor de umidade, para as quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar utilizadas neste estudo. A Figura 39 mostra claramente que, desde o início do processo de secagem até próximo de 30 - 35% de umidade, a variação da resistência elétrica em função da umidade da madeira é muito pequena para exercer alguma influência na relação. Entretanto, a medida que o teor de umidade diminui a partir de aproximadamente 30%, verifica-se um aumento quase que linear no valor da resistência elétrica até o final da secagem.

A partir dessas constatações, e com base em observações de outros pesquisadores (SKAAR, 1972; VERMAAS, 1982b; FORRER & VERMAAS, 1987; MACKAY & OLIVEIRA, 1989; HOLMES & FORRER, 1989; WENGERT, 1992;), estabeleceu-se uma correlação entre a resistência elétrica da madeira e o seu teor de umidade para os quatro programas de secagem e duas velocidades de ar, no intervalo em que essas variáveis apresentaram maior afinidade, ou seja, na faixa entre aproximadamente 30 e 10% de umidade.

O grau de correlação entre as duas variáveis foi avaliado através de modelos de regressão linear simples, os quais são apresentados na Tabela 14, visto que nesta fase do

estudo não havia interesse em encontrar os modelos que melhor se ajustassem aos dados das quatro temperaturas de secagem. Entretanto, as estimativas dos parâmetros obtidas através de modelos exponenciais foram muito semelhantes, razão pela qual optou-se pelas equações lineares, comumente utilizadas nas pesquisas sobre o assunto. VERMAAS (1982b) empregou os dois modelos para o intervalo de temperatura entre 20 e 100°C, e tanto na regressão linear como na curvilínea obteve excelentes coeficientes de determinação. Sua pesquisa, no entanto, foi conduzida em escala de laboratório, utilizando corpos de prova de dimensões reduzidas.

FIGURA 39 - CURVA TÍPICA PARA A RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA ELÉTRICA E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTI* SUBMETIDA A SECAGEM EM ESTUFA COM CIRCULAÇÃO DE AR



A análise de regressão da resistência elétrica da madeira em função do teor de umidade, apresentada na Tabela 14, juntamente com a análise dos resíduos, evidencia que houve um bom ajuste dos modelos lineares ao conjunto de dados, para as quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar. O menor coeficiente de determinação foi encontrado para a temperatura de 50°C, e indica que pelo menos 95% dos dados são explicados pelo modelo. O teor de umidade de algumas das equações relacionadas na Tabela 14 foi logaritmizado sempre que este procedimento resultou em melhoria das estimativas dos parâmetros. Esta atitude também foi adotada por VERMAAS (1982b), nos estudos conduzidos com *Pinus radiata*, para o intervalo de umidade entre 3,2 e 23,8%. A relação obtida com o aumento da resistência

elétrica e a diminuição do teor de umidade da madeira, foi altamente significativa nas quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar, como mostra a análise da variância apresentada na Tabela A10 dos anexos.

TABELA 14 - CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA ELÉTRICA E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA NA FAIXA ENTRE 30 E 10% DE UMIDADE E EQUAÇÕES RESULTANTES

TS	V	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	N	R^2	Syx	F
50	2,3	LnR = 18,93253 - 0,28413tu	770	0,961	0,3377	18863**
50	5,0	LnR = 20,63714 - 0,21137tu	777	0,956	0,2508	16706**
70	2,3	LnR = 20,51588 - 0,26048tu	488	0,974	0,2585	18442**
70	5,0	LnR = 31,66337 - 4,91943lntu	503	0,973	0,2391	18466**
90	2,3	LnR = 36,90564 - 6,32742lntu	342	0,987	0,2002	26061**
90	5,0	LnR = 26,11714 - 3,74133lntu	281	0,961	0,2283	6964,4**
110	2,3	LnR = 21,07381 - 2,19598lntu	239	0,972	0,1149	8109**
110	5,0	LnR = 19,58208 - 0,21431tu	149	0,989	0,1335	12958**

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; LnR = logaritmo natural da resistência elétrica (Ω); tu = teor de umidade da madeira; lntu = logaritmo natural do teor de umidade

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Os coeficientes de correlação obtidos na análise de regressão, apresentaram valores mínimo e máximo de 0,97 e 0,99, respectivamente, entre os oito modelos de regressão da Tabela 14. Estes índices sugerem uma excelente correlação entre as duas variáveis, para o intervalo de umidade considerado.

Com respeito a correlação estabelecida entre a resistência elétrica da madeira e o seu teor de umidade, é oportuno esclarecer que as medições das duas variáveis foram coletadas pelo sistema de aquisição de dados, para cada temperatura de secagem, em intervalos de 80 segundos, aproximadamente, independente da temperatura do bulbo seco. Deve-se destacar também, que o ajuste dos modelos, provavelmente, foi afetado negativamente pela histerese da

célula de carga, que influenciou o cálculo do teor de umidade, e pelos efeitos da polarização e deposição eletrolítica sobre a resistência elétrica da madeira. Para contornar a situação e eliminar os efeitos da polarização, a cada medição VERMAAS (1982b) inverteu a polaridade das conecções, e para evitar a deposição eletrolítica e polarização manteve os eletrodos em curto-circuito durante o período de aquecimento do material. Esses procedimentos, contudo, não foram adotados em nenhum momento no presente estudo.

4.3.4.2. Influência da temperatura de secagem

Segundo CLARK & WILLIAMS (1933), citados por VERMAAS (1982a), quando a temperatura aumenta são liberados íons num processo endotérmico, causando, desse modo, um aumento na condutividade (ou um decréscimo na resistividade). A resistência à passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos diminui rapidamente com o aumento da temperatura (SIAU 1984), e o efeito desta torna-se maior com a redução do teor de umidade da madeira (LIN, 1967).

A avaliação, através de regressão linear, da influência da temperatura de secagem na relação entre o logaritmo da resistência elétrica da madeira e o seu teor de umidade, no intervalo entre o PSFt e 10%, confirmam as referências anteriores. Os resultados evidenciaram que, para um determinado teor de umidade, quanto maior a temperatura de secagem, menor foi o logarítmicos da resistência elétrica, como mostra a Figura 40. As curvas de regressão obtidas para as temperaturas de 50, 70, 90 e 110°C, além de semelhantes, apresentam a mesma tendência daquelas obtidas por SKAAR (1972) para temperaturas entre 0 e 80°C.

Em seu manual, SKAAR (1972) menciona o termo resistividade ou resistência específica, que corresponde a resistência elétrica de um corpo de seção reta uniforme, com área e comprimento unitários, em ohm.cm. Já a resistência elétrica é a propriedade que a substância madeira tem de se opor à passagem de corrente, em ohm. Para uma amostra prismática, a relação entre elas é a seguinte:

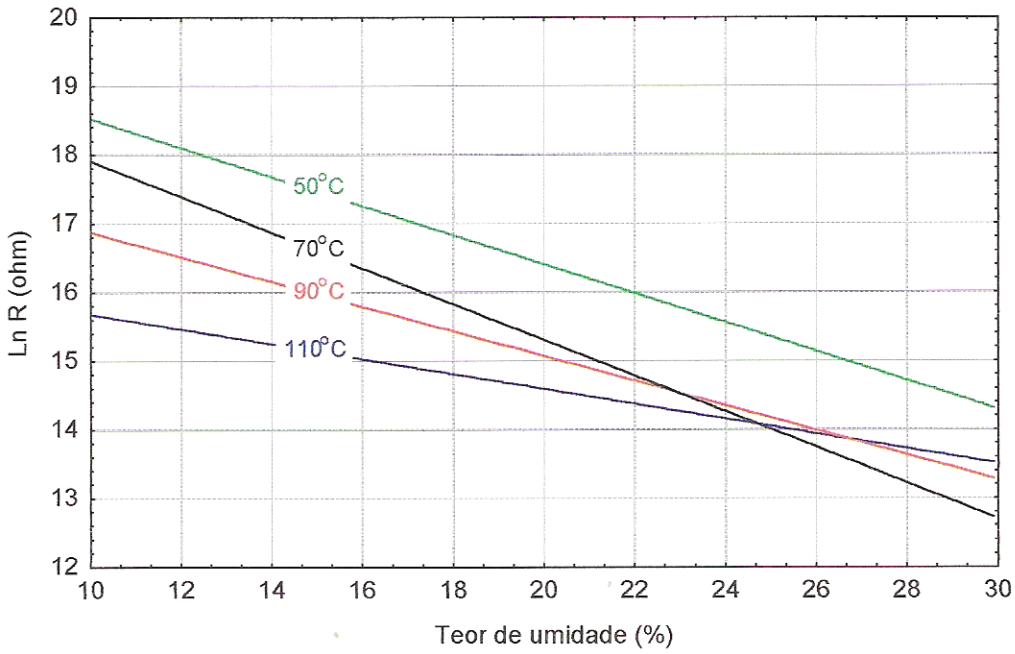
$$\frac{R}{r} = \frac{S}{D}$$

onde,

S = distância entre os eletrodos, mm R = resistência elétrica, Ω

D = diâmetro dos eletrodos, mm r = resistividade, Ω.cm

FIGURA 40 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE SECAGEM NA RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA (LnR) E TEOR DE UMIDADE



De acordo com a curva desenvolvida por SKAAR (1972), as duas resistências atingem a igualdade quando a relação S/D for igual a 12,5. No presente estudo, em que foram empregados pinos de 4 mm de diâmetro, afastados 25 mm entre si, a relação R/r correspondeu a 6,25. Com os eletrodos utilizados, para que a relação R/r fosse igual à unidade, a distância entre eles deveria ser de 50 mm. Todavia, esses dois fatores, diâmetro dos eletrodos e distância entre eles, que juntamente com o isolamento, profundidade de penetração e orientação do campo elétrico, influem na medição da resistência elétrica da madeira, foram mantidos constantes e, portanto, desconsiderados no presente estudo.

Da correlação entre resistência elétrica sob corrente contínua e teor de umidade da madeira, no intervalo entre o PSFt e 10%, para quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar, os seguintes aspectos devem ser ressaltados:

a) Os eletrodos para medição da resistência elétrica foram cravados paralelamente à grã da madeira, onde a mesma é menor do que na direção transversal (SKAAR, 1972) e mais facilmente obtida. Na direção longitudinal estão orientados os principais elementos condutores de umidade, e os efeitos decorrentes da presença de lenho outonal em madeira de *Pinus elliottii* são menores;

b) Resistência elétrica sob corrente contínua e teor de umidade em madeira de *Pinus elliottii* se relacionaram satisfatoriamente, apenas entre o PSFt e 10%, onde foram obtidos coeficientes de correlação entre 0,97 e 0,99, semelhantes àqueles encontrados nos testes preliminares. Como se esperava, nenhuma correlação entre as variáveis foi observada para teores de umidade superiores a esse intervalo;

c) A análise das curvas de resistência elétrica, em função do teor de umidade, não evidenciou uma tendência claramente definida, com respeito a temperatura de secagem. Contudo, curvas obtidas através da análise de regressão linear, confirmaram as observações de SKAAR (1972), de que o logaritmo natural da resistência elétrica diminui a medida que temperaturas de secagem mais elevadas são utilizadas.

4.4. AJUSTE DE MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA.

Nas análises conduzidas anteriormente, empregou-se o teor de umidade como variável "independente", e TDAL, temperatura da madeira, resistência elétrica, e relação temperatura da madeira/temperatura do bulbo úmido como variáveis "dependentes". As interrelações estabelecidas entre elas tiveram como objetivo avaliar, através da análise de regressão simples, o grau de correlação existente entre o teor de umidade e cada uma das variáveis dependentes citadas. Conhecidos esses resultados e confirmada a existência de correlação, procedeu-se o ajuste de modelos de regressão para estimar o teor de umidade da madeira, utilizando-o como variável dependente.

O critério adotado para selecionar o modelo de regressão que melhor se ajustou ao conjunto de dados observados para cada um dos quatro programas de secagem e duas velocidades de ar, levou em consideração o coeficiente de determinação (R^2), o valor de F calculado, o erro padrão da estimativa ou residual (Syx) e a análise gráfica dos resíduos.

4.4.1. Modelos de regressão que incorporam a TDAL

A estimativa do teor de umidade da madeira a partir da TDAL, utilizando modelos de regressão linear, não apresentou resultados satisfatórios. Os modelos polinomiais, que melhor

se ajustaram aos dados dos quatro programas de secagem, produziram estimativas dos parâmetros relativamente fracas e resíduos relativamente elevados, para os valores estimados. Por esta razão, através do uso da regressão múltipla testou-se a possibilidade de inclusão de outras variáveis no modelo, na tentativa de melhorá-lo.

A inclusão da temperatura do bulbo úmido (tbu) produziu melhores ajustes nos modelos de regressão Esta variável, que juntamente com a temperatura do bulbo seco regula as condições da câmara de secagem, é controlada pelo sistema de vaporização e pelas janelas de ventilação. A abertura das janelas de ventilação, realizada por ocasião da mudança de fase do programa de secagem para diminuir o valor da tbu, através da entrada de ar externo, provocou uma alteração substancial nas condições de secagem. O resfriamento da estufa produziu num primeiro momento, um aumento, e posteriormente, uma diminuição da TDAL, resultando numa alta dispersão nos valores desta variável, como mencionado anteriormente. A abertura das janelas de ventilação provocaram mudanças na tbu, as quais influenciaram as leituras de teor de umidade e TDAL.

Com o auxílio da regressão múltipla, a inclusão tbu juntamente com a TDAL, possibilitou a obtenção das equações de regressão apresentadas na Tabela 15. Dentre os vários modelos testados, estes foram os que apresentaram melhor desempenho para as quatro temperaturas de secagem e as duas velocidades de ar estudadas. Entretanto, a exceção da alta temperatura, as estimativas dos parâmetros e a análise dos resíduos não permitem afirmar com segurança que esses modelos ajustam satisfatoriamente os dados observados.

Dentre os quatro programas de secagem conduzidos, a análise de regressão múltipla que inclui a temperatura de bulbo úmido e a TDAL para estimativa do teor de umidade mostrou que os melhores modelos foram obtido para a temperatura de 110°C , principalmente para a velocidade de ar de 5,0 m/s. Nesse programa, o alto coeficiente de determinação (R^2 = 0,974) e a análise da variância apresentada na Tabela A11 dos anexos, sugerem que houve um bom ajuste do modelo ao conjunto de dados, e o valor de F indica que o mesmo foi significativo ao nível de 1% de probabilidade. Este fato evidencia que a estimativa do teor de umidade da madeira a partir das leituras da TDAL é uma alternativa promissora para os processos de secagem a alta temperatura, principalmente quando a temperatura de bulbo úmido é incluída no modelo e altas velocidades de ar são utilizadas.

TABELA 15 - MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA A PARTIR TDAL PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR

TS	V	MODELO DE REGRESSÃO	N	R^2	Syx	F
50	2,3	$TU = 522,8809+2,4298X1-29,2537X2+0,9366X1^2+0,4176X2^2$	3058	0,856	11,7340	4542,0**
50	5,0	$TU = 344,5288+7,5567X1-20,0143X2+0,8456X1^2+0,2960X2^2$	3194	0,842	11,7360	4239,6**
70	2,3	$TU = 305,7787-3,5358X1-13,3868X2+1,1679X1^2+0,1501X2^2$	2327	0,750	13,5750	1741,1**
70	5,0	$TU = 383,1413-1,0845X1-15,7125X2+1,1223X1^2+0,1646X2^2$	1808	0,881	9,2696	3348,3**
90	2,3	$TU = 595,4648-6,6194X1-17,6520X2+1,1598X1^2+0,1349X2^2$	2076	0,786	9,9108	1903,0**
90	5,0	$TU = 571,4667+2,1156X1-17,5498X2+0,8354X1^2+0,1345X2^2$	1322	0,861	8,8869	2050,5**
110	2,3	$TU = 754,2694-11,0317X1-18,9181X2+0,9758X1^2+0,1260X2^2$	719	0,889	8,3861	1442,4**
110	5,0	$TU = 175,1563-5,1586X1-4,8150X2+0,6999X1^2+0,0374X2^2$	446	0,974	3,9963	4193,0**

onde: TS = temperatura de secagem (°C);V = velocidade do ar (m/s); N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; TU = teor de umidade da madeira (%); X1 = TDAL (°C); X2 = TBU (°C)

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

4.4.2. Modelos de regressão que incorporam a temperatura da madeira

Nas análises de regressão linear polinomial realizadas no item 4.3.2., detectou-se uma boa correlação entre a temperatura da madeira e o teor de umidade, apenas para o processo de secagem a alta temperatura. Entretanto, os resultados da análise de regressão múltipla apresentada na Tabela 16, que considera a inclusão da temperatura de bulbo úmido na relação, auxiliados pela análise da variância mostrada na Tabela A12 dos anexos, além de uma influência indefinida da temperatura de secagem, mostram que os modelos resultantes não se ajustaram satisfatoriamente ao conjunto de dados, em cada um dos quatro tratamentos utilizados.

A boa correlação encontrada nos testes preliminares, quando o processo de secagem foi conduzido em estufa de convecção natural, não se repetiu por ocasião da secagem em escala semi-industrial. Isto, provavelmente, ocorreu devido a influência dos fatores que controlam o clima da estufa, como o sistema de vaporização, janelas de ventilação e circulação de ar. Nas estufas de laboratório, a transferência de calor ocorre quase que exclusivamente por convecção natural, produzindo um aquecimento mais lento da madeira. Deste modo, a temperatura do material aumenta gradualmente, de uma forma constante e uniforme, e demora um período de tempo maior para alcançar o equilíbrio com as condições da câmara. Além disso, deve-se ressaltar que, nos testes preliminares, os dados de teor de umidade e temperatura da madeira foram coletados de uma única tábua, enquanto que no experimento principal, os mesmos foram obtidos, respectivamente, a partir da carga de madeira e de uma tábua localizada na entrada de ar na pilha.

Na tentativa de melhorar o ajuste dos modelos apresentados na Tabela 16, realizou-se uma nova análise de regressão para o intervalo entre o PSFt e 10% de umidade, cujos resultados são mostrados na Tabela 17. Dentre as temperaturas de secagem analisadas, os modelos se ajustaram melhor nas temperaturas de 90 e 110°C, sendo que os maiores coeficientes de determinação (R^2) foram encontrados para o processo a alta temperatura. O ajuste dos modelos resultantes da análise de regressão múltipla para as temperaturas de 50 e 70°C foram muito fracos nas duas velocidades de ar consideradas, razão pela qual não são mencionados na Tabela 17.

TABELA 16 - MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE PARTIR DA TEMPERATURA DA MADEIRA PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR

TS	V	MODELO DE REGRESSÃO	N	R^2	Syx	F
50	2,3	TU = 998,9981 - 21,9671X1 + 3,5086X2	2978	0,963	5,7325	39040,9**
50	5,0	TU = 1101,646 - 24,0140X1 + 3,6120X2	3160	0,879	10,0860	11466,4**
70	2,3	TU =1487,854 - 23,1350X1 + 2,3100X2	2275	0,878	9,1978	8162,3**
70	5,0	TU = 921,9982 - 14,1498X1 + 2,2062X2	1724	0,897	8,0827	7517,8**
90	2,3	TU = 754,5310 - 9,4521X1 + 1,6005X2	2021	0,946	4,7704	17863,0**
90	5,0	TU = 1316,718 - 15,7470X1 + 1,9030X2	1281	0,904	7,0514	6034,8**
110	2,3	TU = 2990,384-57,163X1+3,654X2+0,259$X1^2$-0,017$X2^2$	719	0,947	5,7944	3216.6**
110	5,0	TU = 1835,46-21,115X1-16,303X2+0,093$X1^2$+0,105$X2^2$	389	0,917	5,8053	1070,0**

onde: TS = temperatura de secagem (°C);V = velocidade do ar (m/s); N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; TU = teor de umidade da madeira (%); X1 = temperatura da madeira (°C); X2 = TBU (°C)

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

A comparação entre as Tabelas 16 e 17, evidencia que os modelos de regressão obtidos para a faixa de umidade entre o PSFt e 10% se ajustaram melhor aos dados, particularmente para a temperatura de 110°C. A melhor correlação encontrada nesta faixa de umidade restrita pode estar associada a uma certa estabilidade dos dados no final do processo de secagem, quando as condições da câmara são mais uniforme, e ao calor de vaporização produzido por ocasião da evaporação da água superficial da madeira (KOTOK et al., 1969), conforme mencionado anteriormente.

TABELA 17 - MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA TEMPERATURA DA MADEIRA, PARA AS TEMPERATURAS DE SECAGEM DE 90 E 110°C E DUAS VELOCIDADES DE AR, NO INTERVALO ENTRE O PSFt E 10%

TS	V	MODELO DE REGRESSÃO	R^2	Syx	F
90	2,3	$TU = -4273,59+101,060X1-3,320X2-0,583X1^2+0,031X2^2$	0,948	1,2266	1527,7**
90	5,0	$TU = 12850,34-276,914X1-3,168X2+1,503X1^2+0,029X2^2$	0,932	1,6055	952,5**
110	2,3	$TU = 1270,910-20,065X1+0,272X2+0,076X1^2+0,003X2^2$	0,952	1,3451	1154,7**
110	5,0	$TU = 825,328-13,126X1-1,799X2+0,057X1^2+0,013X2^2$	0,974	0,9529	1348,5**

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; X1 = temperatura da madeira (°C); X2= temperatura do bulbo úmido TBU (°C) TU = teor de umidade (%); PSFt = ponto de saturação das fibras teórico

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Numa comparação com os estudos conduzidos em estufas de laboratório, o modelo polinomial encontrado para a temperatura de 110°C e velocidade de 2,3 m/s (Tabela 17) foi o que mais se aproximou daquele obtido para a mesma temperatura nos testes preliminares. Deve-se ressaltar que, nas demais temperaturas, os melhores modelos encontrados no experimento principal são aqueles que consideram a inclusão da temperatura do bulbo úmido. Mesmo assim, quando se compara os resultados dos dois testes, verifica-se que os modelos polinomiais de quarto grau, que incluem apenas a temperatura da madeira (Tabela 6), apresentaram melhor desempenho que os modelos de regressão múltipla, que incluem também a temperatura do bulbo úmido (Tabela 16).

Essas diferenças observadas entre os dois testes, provavelmente, está relacionada ao programa de secagem empregado no experimento principal que, em comparação com os testes preliminares, introduziu as variáveis velocidade do ar e temperatura do bulbo úmido. Como discutido previamente, o uso de velocidades de ar mais altas aumentam a transferência de calor para a madeira, provocando um aumento na sua temperatura (SALAMON, 1969). Num processo controlado, a temperatura do bulbo úmido, por sua vez, é a responsável pelo controle das condições internas, realizado através das janelas de ventilação e sistema de produção de vapor. Em razão dessas funções, esta variável exerce grande influência na temperatura da madeira, fato este constatado nos modelos de regressão desenvolvidos para estimar o teor de umidade a partir da TDAL, temperatura da madeira e coeficiente TM/TBU.

4.4.3. Modelos de regressão que incorporam o coeficiente TM/TBU

Os modelos de regressão desenvolvidos para estimar o teor de umidade a partir da relação temperatura da madeira/temperatura do bulbo úmido, bem como as estimativas dos parâmetros, para as quatro temperaturas de secagem e duas velocidade de ar, são relacionados na Tabela 18. Da mesma forma que na correlação estabelecida entre as duas variáveis no item 4.3.3., o modelo polinomial foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais observados, predominando no presente caso polinômios de quinto grau e, nos anteriores, de terceiro grau.

A análise das estimativas dos parâmetros obtidas para cada modelo de regressão apresentado na Tabela 18, e a análise da variância mostrada na Tabela A13 dos anexos, não permitem afirmar com segurança, que os mesmos se ajustam satisfatoriamente ao conjunto de dados observados, embora a variância explicada tenha sido superior a 90%. Com base no coeficiente de determinação (R^2), os modelos polinomiais relacionados na Tabela 18 explicam entre 91,1 e 98,5% da variabilidade dos dados observados e, em conseqüência, respondem por apenas 1,5 a 8,9% da variabilidade residual. Num primeiro momento, coeficientes de determinação tão altos quanto 0,98, obtido para as temperaturas de 50 e 110°C, podem sugerir um bom ajuste. Entretanto, a análise dos resíduos resultantes do teor de umidade estimado através daqueles modelos, evidencia um ajuste deficiente dos mesmos.

TABELA 18 - MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DO COEFICIENTE TM/TBU PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR

TS	V	MODELO DE REGRESSÃO	N	R^2	Syx	F
50	2,3	$TU = 111607-422147X+637374X^2-479913X^3+180194X^4-26994X^5$	3027	0,982	4,0464	33849,3**
50	5,0	$TU = 18096,3-51869,7X+55516,7X^2-26239,1X^3+4617,8X^4$	3155	0,911	8,6012	8122,9**
70	2,3	$TU = 38326-130973X+177390X^2-118879X^3+39403X^4-5167X^5$	2212	0,935	6,4434	6424,6**
70	5,0	$TU = 47913-168608X+236451X^2-164983X^3+57252X^4-7904X^5$	1770	0,974	4,2373	13066,1**
90	2,3	$TU = 99449-383036X+588097X^2-449565X^3+171035X^4-25900X^5$	2036	0,972	3,4865	14090,2**
90	5,0	$TU = 58728-209212X+296688X^2-209182X^3+73299X^4-10210X^5$	1307	0,969	4,0661	8395,9**
110	2,3	$TU = 149830-570652X+865810X^2-653832X^3+245728X^4-36770X^5$	715	0,985	3,0661	9308,8**
110	5,0	$TU = 104349-391036X+582710X^2-431416X^3+158669X^4-23192X^5$	446	0,955	5,3230	1852,4**

onde: TS = temperatura de secagem (°C);V = velocidade do ar (m/s); N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; TU = teor de umidade da madeira (%); X = coeficiente TM/TBU

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Conforme previamente discutido e ilustrado no item 4.3.3., o efeito da velocidade do ar e da temperatura de secagem na relação entre teor de umidade e coeficiente TM/TBU foi pouco evidente. Na presente análise, contudo, exceto para a temperatura de 70°C, o uso de velocidades de ar menores, parecem sugerir um melhor ajuste para os modelos de regressão, fato este que já havia sido observado nas correlações estabelecidas anteriormente. Por outro lado, a temperatura de secagem parece não afetar esse ajuste, uma vez que os resultados estatísticos não evidenciam qualquer tendência entre 50 e 110°C.

Os resultados da análise apresentada na Tabela 18, e da correlação discutida anteriormente, evidenciam claramente uma boa relação entre o coeficiente TM/TBU e o teor de umidade, e também, que os modelos obtidos se ajustaram razoavelmente aos dados observados. Entretanto, dois aspectos devem ser ressaltados:

a) o intervalo de variação do coeficiente é relativamente pequeno, oscilando entre 1,0 e 1,8 no presente estudo, podendo alcançar em torno de 2,0, dependendo do teor de umidade final; e

b) não houve uma influência bem definida da temperatura de secagem nem da velocidade do ar, na relação entre o coeficiente TM/TBU e o teor de umidade.

Apesar dessas observações, os resultados desse estudo indicam que o coeficiente TM/TBU apresenta boas perspectivas de uso como meio de controle do processo, principalmente para estabelecer o final da secagem. Entretanto, parece importante estabelecer uma relação com a temperatura de secagem e com a velocidade do ar, além da definição dos limites de coeficientes a serem adotados para a finalização do processo de secagem.

4.4.4. Modelos de regressão que incorporam a resistência elétrica da madeira

Três modelos de regressão foram utilizados para obtenção das equações estimadoras do teor de umidade a partir da resistência elétrica da madeira, os quais seguem:

- linear: $y = a + b.x$
- multiplicativo: $y = a.x^{b}$
- exponencial: $y = a + e^{(b_0 + b_1.x)}$

As equações para cada um desses modelos e temperatura de secagem, apresentadas na Tabela 19 para a velocidade do ar de 2,3 m/s, e na Tabela 20 para a de 5,0 m/s, mostram que as estimativas dos parâmetros foram muito semelhantes nos três modelos, razão pela qual optou-se pela tabulação de todos. Todavia, uma análise gráfica dos resíduos, evidenciou que o

TABELA 19 - MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E VELOCIDADE DE AR DE 2,3 M/S

TS	N	MODELO DE REGRESSÃO	R^2	Syx	S^2	F
		$TU = 64,79722 - 3,382889LnR$*	0,966	1,0818	1,1688	133456**
50	770	$TU = 3802,01819LnR^{-2,05387}$	0,936	1,4822	2,1939	70911**
		$TU = -357,9572+e^{(6,052987-0,008937LnR)}$	0,966	1,0879	1,1804	87972**
		$TU = 77,27272 - 3,738956LnR$*	0,974	0,9795	0,9596	128612**
70	488	$TU = 11736,966LnR^{-2,3494}$	0,940	1,5013	2,2490	54613**
		$TU = -337,6075+e^{(6,03848-0,010393LnR)}$	0,974	0,9886	0,9731	84181**
		$TU = 74,27621 - 2,980810LnR$	0,970	0,9244	0,8520	95079**
90	342	$TU = 63347,1102LnR^{2,7954}$	0,988	0,5808	0,3363	241089**
		$TU = 1,75560+e^{(5,989456-0,172107LnR)}$*	0,989	0,5676	0,3203	168283**
		$TU = 146,49547 - 8,664210LnR$	0,943	1,4533	2,1032	25835**
110	239	$TU = 849293786LnR^{-7,0}$	0,978	0,8970	0,8011	67998**
		$TU = 5,01725+e^{(11,54795-0,611318LnR)}$*	0,979	0,8817	0,7709	46927**

onde: TS = temperatura de secagem (°C);N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; S^2 = variância da amostra; F = valor de F calculado; TU = teor de umidade da madeira (%); LnR = logaritmo natural da resistência elétrica (ohm); e = exponencial; * melhores modelos;
** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

TABELA 20 - MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E VELOCIDADE DE AR DE 5,0 M/S.

TS	N	MODELO DE REGRESSÃO	R^2	Syx	S^2	F
		$TU = 94,159725 - 4,519583LnR$	0,956	1,1603	1,3445	122410**
50	777	$TU = 318337,128LnR^{-3,473}$	0,944	1,3063	1,7040	96491**
		$TU = -45,29930+e^{(5,30338-0,06872LnR)}$*	0,957	1,1439	1,3051	83970**
		$TU = 83,97714 - 3,735695LnR$	0,949	1,2779	1,5298	62398**
70	503	$TU = 344283,482LnR^{-3,452}$	0,981	0,7689	0,5899	172779**
		$TU = 4,66466 + e^{(7,28689-0,27030LnR)}$*	0,982	0,7632	0,5801	116927**
		$TU = 95,85214 - 5,022920LnR$	0,906	1,8819	3,5290	19627**
90	281	$TU = 1461946,37LnR^{-4,150}$	0,958	1,2541	1,5659	44372**
		$TU = 11,18147 + e^{(12,47560-0,70280LnR)}$*	0,973	0,9988	0,9905	46687**
		$TU = 90,79143 - 4,628187LnR$*	0,992	0,5276	0,2765	113055**
110	149	$TU = 145602,56LnR^{-3,279}$	0,958	1,1904	1,4066	22153**
		$TU = -297,74556 + e^{(5,98380-0,01456LnR)}$	0,991	0,5360	0,2833	73027**

onde: TS = temperatura de secagem (°C);N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; S^2 = variância da amostra; F = valor de F calculado; TU = teor de umidade da madeira (%); LnR = logaritmo natural da resistência elétrica (ohm); e = exponencial; * melhores modelos;
** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

modelo exponencial se ajustou melhor ao conjunto de dados observados. As análises da variância para os três modelos testados encontram-se nos anexos, na Tabela A14 (linear), Tabela A15 (multiplicativo) e Tabela A16 (exponencial).

Considerando-se apenas o modelo exponencial, verifica-se na Tabela 19 que os valores de teor de umidade estimados através dos modelos, mostram uma variabilidade de 1,1 a 3,4% em torno da linha de regressão, entre as quatro temperaturas de secagem. Isto significa, que as variáveis incluídas no modelo explicam entre 96,6 e 98,9% da variabilidade dos dados. Na Tabela 20, para o mesmo modelo de regressão, a variabilidade residual oscilou entre 0,9 e 4.3%, o que corresponde a uma variância explicada entre 95,7 e 99,1%.

Os estudos encontrados na literatura, sobre a relação entre resistência elétrica e teor de umidade da madeira, foram conduzidos em estufas de laboratório tipo convecção natural, sem controle da velocidade do ar e da temperatura do bulbo úmido. Os modelos exponenciais desenvolvidos por VERMAAS (1982b), apresentaram excelentes ajustes, mas foram obtidos num equipamento de dimensões reduzidas, completamente controlado, como aquele descrito por VERMAAS & NEVILLE, (1988), em que os dados foram coletados a partir da secagem de uma única tábua. Numa situação como essa, é possível manter um controle rigoroso sobre o processo, o que permite a obtenção de modelos tão ajustados aos dados, como aqueles encontrados por VERMAAS (1982b) para *Pinus radiata* e *Pinus pinaster*. Entretanto, quando se transfere essas experiências para a escala industrial, onde grandes volumes de madeira são utilizados, e a secagem sofre a interferência de um conjunto de variáveis envolvidas no processo, a relação resistência elétrica/teor de umidade é influenciada por esses fatores, prejudicando o ajuste dos modelos. Contudo, os modelos encontrados para as quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar, demostram que o uso da resistência elétrica possibilita estimativas confiáveis do teor de umidade da carga, na faixa de umidade entre aproximadamente 30 e 10%.

4.5. AVALIAÇÃO TÉCNICO-OPERACIONAL DOS SISTEMAS ESTUDADOS

4.5.1. Sistemas convencionais

Dois métodos são convencionalmente empregados no monitoramento do teor de umidade, durante a secagem de madeiras em estufa: pesagem de amostras e medidores elétricos.

A pesagem de amostras de controle é o método mais conhecido e utilizado, e as principais razões para isso são:

- simplicidade
- baixo custo
- usada em qualquer faixa de umidade.

Entretanto, o método apresenta dificuldades, como:

- necessidade de abertura da estufa para pesagem da amostra
- tempo requerido para confecção das amostras
- amostras devem ser representativas da carga de madeira
- necessita presença constante de um operador.

Além disso, as amostras devem ser em número suficiente e bem distribuídas, para que o teor de umidade médio calculado seja representativo da carga. Caso os procedimentos de seleção, preparação, distribuição e pesagem das amostras sejam adequados, o método proporciona um controle eficiente do processo de secagem com respeito ao teor de umidade, qualidade do material, programa e tempo de secagem, e desempenho do equipamento.

Um método de que vem substituindo o anterior no monitoramento da umidade da madeira é o medidor elétrico, cujos princípio e características de funcionamento foram revisados anteriormente nos itens 2.1.3.1. e 2.4.5.3 do capítulo 2. Esses aparelhos apresentam as seguintes vantagens:

- leituras rápidas do teor de umidade
- leituras suficientemente precisas abaixo do PSF

A confiabilidade do sistema é reduzida, quando:

- ocorrem de gradientes de umidade na madeira
- a umidade da madeira é superior ao PSF
- as amostras selecionadas não são representativas

- número de amostras é insuficiente
- secagem é conduzida a alta temperatura.

Além da necessária introdução de pinos ou pregos na madeira, e de todos os cuidados inerentes a esse procedimento, na maioria dos casos os medidores elétricos não operam continuamente devido, aos efeitos da polarização e eletrólise nos eletrodos. Esse inconveniente, entretanto, poderia ser superado, ligando-se o sistema apenas para fazer a leitura, e desligando-o em seguida.

O teor de umidade estimado através dos modelos de equações exponenciais relacionados nas Tabelas 19 e 20, no período de secagem entre aproximadamente 30 e 10%, foi praticamente igual ao obtido pelo método de pesagem da carga, considerado neste estudo como padrão, nas quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar investigadas. As curvas de secagem obtidas pelos métodos de resistência elétrica e de pesagem, juntamente com as de outras três alternativas estudadas, são ilustradas na Figura 41 para as temperaturas de 50 e 110°C e duas velocidades de ar. Os resultados evidenciaram que o método baseado na resistência elétrica apresenta uma estimativa confiável para a faixa de umidade mencionada, fato que se apoia na literatura revisada e no bom ajuste dos modelos exponenciais ao conjunto de dados observados, conforme discussão prévia no item 4.4.4. Caso seja necessário a confecção de uma curva de secagem para todo o processo, uma das alternativas seria a adoção de um outro princípio de controle até o ponto de saturação das fibras, e a partir deste, a utilização dos medidores elétricos para o monitoramento do teor de umidade da madeira.

4.5.2. Sistemas não convencionais

Sistemas não convencionais, são considerados aqueles métodos pouco utilizados, seja por razões econômicas ou operacionais, e os que se apresentam como alternativas promissoras e encontram-se em fase de estudo. Nesta linha, pode-se incluir a pesagem através de célula de carga, a variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL), e a própria temperatura da madeira. Esta sendo acrescentado nesta análise, o coeficiente TM/TBU, como uma quarta possibilidade para estimativa do teor de umidade da madeira.

A pesagem da pilha de madeira através de célula de carga apresenta as seguintes características positivas:

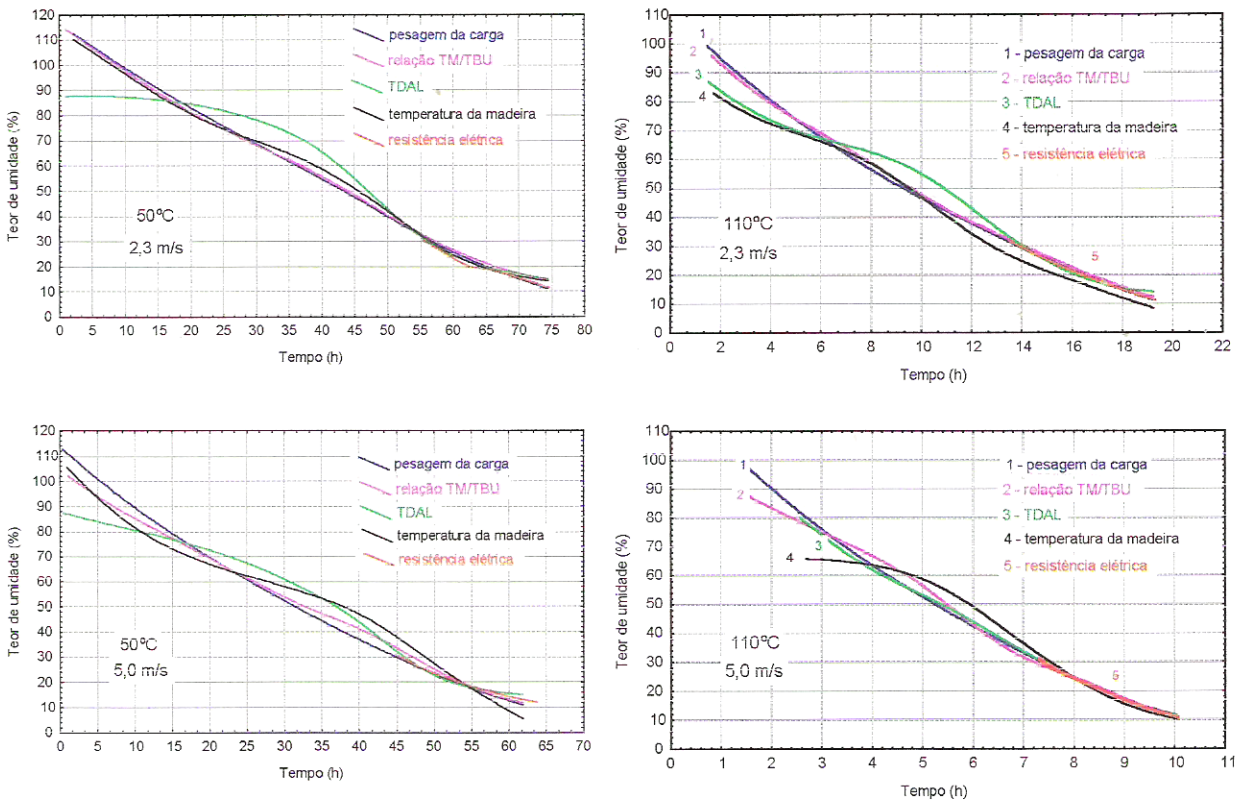
- rápida obtenção do teor de umidade

- teor de umidade estimado é representativo
- permite o uso de sistemas de controle computadorizados

Dentre as negativas, as principais são:

- conhecimento prévio do teor de umidade inicial
- depreciação relativamente rápida do sistema, devido as condições do ambiente
- dificuldade de aplicação em escala comercial

FIGURA 41 - CURVAS DE SECAGEM ESTIMADAS PARA MADEIRA SERRADA DE *PINUS ELLIOTTII*, ATRAVÉS DE MODELOS DE REGRESSÃO E PELO MÉTODO DE PESAGEM DA CARGA, PARA DUAS TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR



A melhor alternativa para a coleta do peso, seria o uso de células de carga tipo tração, instaladas fora da estufa e, portanto, livres da ação prejudicial das condições ambientais sobre a sensibilidade do equipamento. Entretanto, como é difícil viabilizar isso em escala industrial, resta a possibilidade de usar células do tipo compressão, colocadas embaixo da pilha de

madeira, ou nos trilhos do carrinho. Uma vez sanadas as dificuldades de instalação das células de carga para medir o peso de toda a pilha ou parte dela, este seria o método ideal de monitoramento do teor de umidade.

Nas curvas de secagem obtidas através deste método (Figura 41), considerado neste estudo como padrão, os valores do teor de umidade em função do tempo, apresentaram um excelente ajuste, sendo praticamente insignificante a dispersão dos dados observados, nas quatro temperaturas de secagem e duas velocidades de ar. A pequena dispersão detectada deve-se, provavelmente, ao efeito da circulação do ar sobre a pilha de madeira.

A variação da temperatura na pilha (TDAL), que se refere a diferença entre a temperatura do ar na entrada e na saída da mesma, é uma alternativa citada na literatura como promissora para a secagem convencional e a alta temperatura (QUARLES & WENGERT, 1989). A relação entre a queda da temperatura através da pilha e a diminuição do seu teor de umidade, tem como objetivo a criação de um sistema que possibilite o controle do processo e a indicação do momento de finalização do mesmo. O emprego da TDAL como método de controle, tem como principais vantagens:

- facilidade de medição da temperatura
- obtenção da TDAL em tempo real

Como desvantagens, pode-se citar:

- não é indicado para secagem a baixas temperaturas, nem baixas velocidades de ar
- mesmo no final da secagem, ocorre dispersão de TDAL em torno da média.

De acordo com OLIVEIRA (1985), o conceito TDAL já vem sendo utilizado por fabricantes e controladores de estufas do Canadá e Estados Unidos, para indicação do final do processo, ou controle da velocidade de secagem. Entretanto, a TDAL ainda não se impôs como método de controle, porque os resultados prometidos pelos comerciantes nem sempre são alcançados.

Uma boa correlação entre as duas variáveis foi encontrada na secagem a 110°C, principalmente para a velocidade de 5,0 m/s (Tabela 9), condições em que os modelos de regressão também se ajustaram melhor aos dados observados (Tabela 15). A inclusão da temperatura do bulbo úmido nos modelos foi importante, pois contribuiu para a melhoria das estimativas dos parâmetros dos mesmos. Nas demais temperaturas de secagem estudadas, não foram detectadas boas correlações nem bons ajustes nos modelos, o que também havia sido evidenciado em outras pesquisas (HERZBERG et al., 1985). Baixas temperaturas e velocidades de ar, produzem uma TDAL baixa e variável, resultando numa grande dispersão

em torno da linha de regressão. As curvas mostradas na Figura 41 confirmam que, apenas para as altas temperatura e velocidade de ar, o modelo de regressão usado produziu uma curva de secagem quase coincidente com aquela obtida pelo método padrão, e foi praticamente igual no final da secagem, a 10% de umidade. Essas observações evidenciam que o processo de secagem a alta temperatura pode ser controlado através da TDAL, desde que se inclua a temperatura do bulbo úmido no modelo, e altas velocidades de ar sejam utilizadas.

A possibilidade de empregar a temperatura da madeira como uma alternativa para estimar o seu teor de umidade, ou mesmo para indicação do final do processo, foi sugerida a mais de 40 anos (KEYLWERTH, 1952), e boas correlações tem sido evidenciadas, principalmente para a secagem a alta temperatura (PANOW & NESTER, 1985). Apesar disso, há dúvidas ainda acerca do melhor local de medição da temperatura, a qual pode ser tomada na superfície, no centro, ou numa posição intermediária da espessura da madeira. Também neste caso, os dados de temperatura podem ser coletados de forma contínua, através de um sistema computadorizado de aquisição de dados, o que possibilita a tomada de decisão em tempo real sobre o programa e o processo de secagem.

As características das duas alternativas de controle, temperatura interna da madeira e coeficiente TM/TBU, são muito semelhantes àquelas previamente descritas para a TDAL. A facilidade de medição da temperatura interna da madeira e da temperatura do bulbo úmido, bem como a obtenção de ambas em tempo real, são os pontos fortes.

A temperatura interna da madeira correlacionou-se satisfatoriamente com o teor de umidade, apenas na secagem a alta temperatura (Tabela 10), onde foram empregadas equações polinomiais de quarto grau. A inclusão da temperatura do bulbo úmido nos modelos de regressão estimadores do teor de umidade, em comparação com aqueles que a desconsideraram, melhorou o ajuste dos mesmos, aos dados observados (Tabela 16), mas as estimativas dos parâmetros e a análise visual dos resíduos, evidenciaram que a os ganhos não foram suficientes para se igualar aos testes preliminares. Contudo, os gráficos apresentados na Figura 41, mostram que o teor de umidade estimado pelo modelo de regressão que incorpora a temperatura interna da madeira e o obtido pelo método padrão, alcançaram valores muito próximos no final da secagem. Este fato sugere, que a temperatura interna da madeira é uma alternativa viável para indicar o final da secagem, especialmente nos processos que usam altas temperatura e velocidade de ar.

O uso da relação temperatura da madeira/temperatura do bulbo úmido (TM/TBU) como uma alternativa de controle do processo de secagem, não é mencionada na literatura. Apesar do pequeno intervalo de variação (entre 1 e 1,8), os resultados mostraram que o coeficiente TM/TBU pode ser utilizado como meio de controle do processo, principalmente para estabelecer o final do mesmo. Esta constatação é apoiada pela análise visual da Figura 41, onde se observa que as curvas confeccionadas pelos modelos de regressão, ficaram muito próximas daquelas obtidas pelo método padrão, especialmente nos últimos estágios da secagem.

Uma vantagem comum às quatro alternativas não convencionais, é a possibilidade de coleta e armazenamento contínuo dos dados através de um sistema de aquisição de dados, o que agiliza o controle do processo e tomada de decisões rápidas.

Os resultados desse estudo evidenciam que as três últimas alternativas analisadas, apresentam boas perspectivas de utilização para controle do processo de secagem de madeira em estufa. A adoção dessas tecnologias pelos fabricantes, bem como sua aplicação nos equipamentos de secagem existentes, é relativamente simples e de baixo custo, o que vislumbra como promissor o seu uso em escala industrial.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos neste estudo permitem as seguintes conclusões:

a) Nos testes preliminares conduzidos em estufa de convecção natural, boas correlações e razoáveis ajustes dos modelos foram obtidos entre teor de umidade e resistência elétrica da madeira, no intervalo entre aproximadamente 30 e 6% de umidade, para as temperaturas de 50, 70, 90 e 110°C. No período de secagem desde verde (>100%) até o final do processo, encontrou-se alta correlação (R>0,99) entre teor de umidade e temperatura da madeira, medida a ¼ de sua espessura, e os modelos não melhoraram com a incorporação da resistência elétrica.

b) Na secagem em estufa de convecção forçada, a correlação entre resistência elétrica e teor de umidade (0,97<R<0,99) na faixa entre aproximadamente 30 e 10% de umidade, foi semelhante àquela detectada nos testes preliminares, e as estimativas dos parâmetros sugerem um bom ajuste dos modelos exponenciais ao conjunto de dados observados. Para teores de umidade superiores, baixa ou nenhuma correlação foi observada.

c) A correlação entre a variação da temperatura na pilha de madeira (TDAL) e o teor de umidade foi baixa nos processos de secagem convencional e baixa temperatura. A inclusão da temperatura do bulbo úmido no modelo e o bom ajuste obtido para a temperatura de 110°C, indica que a TDAL é uma alternativa de controle viável para o processo alta temperatura, especialmente quando altas velocidades de ar são utilizadas.

d) Os modelos de regressão múltipla que incluem a temperatura do bulbo úmido e a temperatura interna da madeira para estimar o teor de umidade, não mostraram um ajuste tão bom como o encontrado nos testes preliminares. No intervalo desde verde até 10% de umidade, os melhores modelos foram obtidos na secagem a alta temperatura, enquanto que de 30 até 10%, os modelos resultantes para as temperaturas de 90 e 110°C se ajustaram melhor aos dados.

e) A boa correlação encontrada (0,97<R<0,99) entre o coeficiente temperatura interna da madeira/temperatura do bulbo úmido (TM/TBU), e o ajuste satisfatório dos modelos no intervalo desde verde até 10%, sugerem que o mesmo apresenta boas perspectivas de uso como meio de controle do processo de secagem, embora sua faixa de variação (entre 1,0 e 1,8) seja muito restrita.

f) Com relação a avaliação técnico-operacional dos sistemas estudados, conclui-se que:

- os medidores elétricos são confiáveis para estimar teores de umidade abaixo do PSF mas apresentam problemas com relação a seleção da amostra e altas temperaturas de secagem;
- a pesagem da carga seria o método de controle ideal, mas o conhecimento da umidade inicial e os custos de manutenção envolvidos, restringem o seu uso;
- a variação da temperatura na pilha é uma alternativa promissora para altas temperaturas de secagem e velocidades de ar;
- a temperatura da madeira é um bom indicativo do final do processo, principalmente para secagem a alta temperatura;
- o coeficiente TM/TBU, além de prever o final da secagem, é uma alternativa de monitoramento viável para a amplitude de temperatura e velocidade de ar estudada;
- o método de pesagem de amostras é recomendado apenas quando as alternativas anteriores apresentam restrições de uso.

Com base nos estudos realizados, recomenda-se:

a) Investigar em conjunto com fabricantes de estufa de secagem e de equipamentos de controle, a viabilidade técnica e econômica das alternativas estudadas, bem como a melhoria do sistema de sensores, visando sua aplicação no monitoramento do processo em escala industrial.

b) Utilizar uma amplitude maior de velocidade do ar, visando avaliar sua influência sobre as variáveis relacionadas com os sistemas estudados.

c) Investigar outros métodos de monitoramento contínuo do teor de umidade da madeira, como medidores dielétricos tipo capacitivo e perda de potência, e sua aplicação em escala comercial.

d) Conduzir estudos similares a este para outras espécies, visando o ajuste de modelos para estimar o teor de umidade da madeira.

ANEXOS

EQUAÇÕES DE REGRESSÃO

TABELA A1 - EQUAÇÕES DE REGRESSÃO LINEARES PARA ESTIMAR O TEOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* DESDE VERDE ATÉ O FINAL DA SECAGEM (TESTES PRELIMINARES).

TS °C	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	N -	R^2 -	Syx -	F	TUI %	TUF %
50	TU = 152,514 - 8,271LnR	55	0,387	24,157	35,168	144,6	6,1
70	TU = 384,721 - 24,009LnR	47	0,644	25,812	84,417	151,0	7,8
90	TU = 180,969 - 9,134LnR	44	0,538	20,005	51,072	150,1	5,7
110	TU = 351,837 - 16,305LnR	21	0,679	23,248	43,289	140,4	7,9

onde: TS = temperatura de secagem; N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa; F = F calculado; TUI = teor de umidade inicial; TUF = teor de umidade final; TU = teor de umidade; LnR = logaritmo natural da resistência elétrica.

ANEXOS

ANÁLISE DA VARIÂNCIA DA REGRESSÃO

TABELA A2 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DE UMIDADE E RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* SUBMETIDA A QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM DESDE VERDE ATÉ O FINAL DO PROCESSO (TESTES PRELIMINARES).

TS	F.V.	GL	SQ	QM	F
50°C	Regressão	1	20522,96	20522,96	35,168
	Resíduo	53	30928,76	583,56	
	Total	54	51451,72		
70°C	Regressão	1	56241,68	56241,68	84,417
	Resíduo	45	29980,74	666,24	
	Total	46	86222,42		
90°C	Regressão	1	20438,83	20438,83	51,072
	Resíduo	42	16808,20	400,20	
	Total	43	37247,03		
110°C	Regressão	1	23395,61	23395,61	43,289
	Resíduo	19	10268,65	540,46	
	Total	20	33664,26		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = F calculado.

TABELA A3 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DE UMIDADE E RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA ABAIXO DO PSFt PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM (TESTES PRELIMINARES)

TS	FV	GL	SQ	QM	F
50°C	Regressão	3	12473,07	4157,69	9261,0
	Resíduo	46	20,65	0,4489	
	Total	49	12493,72		
70°C	Regressão	3	5702,47	1900,82	771,8
	Resíduo	18	44,33	2,4627	
	Total	21	5746,80		
90°C	Regressão	3	8012,75	2670,92	3402,9
	Resíduo	24	18,83	0,7849	
	Total	27	8031,58		
110°C	Regressão	3	4634,76	1544,92	4142,6
	Resíduo	14	5,22	0,3729	
	Total	17	4639,98		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = F calculado; PSFt = PSF teórico.

TABELA A4 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DE UMIDADE E TEMPERATURA DA MADEIRA DE *PINUS ELLIOTTII* PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM (TESTES PRELIMINARES)

TS	FV	GL	SQ	QM	F
50°C	Regressão	4	71042,50	17760,63	2266,279
	Resíduo	64	501,56	7,84	
	Total	68	71544,06		
70°C	Regressão	4	106779,10	26694,78	951,199
	Resíduo	49	1375,20	28,06	
	Total	53	108154,30		
90°C	Regressão	4	55459,94	13864,99	5164,726
	Resíduo	51	136,91	2,68	
	Total	55	55596,85		
110°C	Regressão	4	40574,34	10143,58	450,874
	Resíduo	19	427,45	22,50	
	Total	23	41001,79		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = F calculado.

TABELA A5 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DE UMIDADE, TEMPERATURA DA MADEIRA E LOGARITMO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA (TESTES PRELIMINARES)

TS	FV	GL	SQ	QM	F
50°C	Regressão	2	41,98	20,99	5183,104
	Resíduo	52	0,21	0,004	
	Total	54	42,19		
70°C	Regressão	2	83322,37	41661,18	632,090
	Resíduo	44	2900,05	65,91	
	Total	46	86222,41		
90°C	Regressão	2	37145,92	18572,96	7531,404
	Resíduo	41	101,11	2,47	
	Total	43	37247,03		
110°C	Regressão	2	33153,39	16576,70	584,057
	Resíduo	18	510,88	28,38	
	Total	20	33664,27		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = F calculado.

TABELA A6 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: CORRELAÇÃO ENTRE TDAL E TEOR DE UMIDADE PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR

TS	V	FV	GL	SQ	QM	F
		Regressão	3	245,38	81,79	163,54
50	2,3	Resíduo	3054	1527,41	0,50	
		Total	3057	1772,79		
		Regressão	3	773,70	257,90	547,29
50	5,0	Resíduo	3190	1503,23	0,47	
		Total	3193	2276,93		
		Regressão	3	721,90	240,63	189,75
70	2,3	Resíduo	2323	2945,92	1,27	
		Total	2326	3667,82		
		Regressão	3	451,38	150,46	116,34
70	5,0	Resíduo	1804	2332,98	1,29	
		Total	1807	2784,36		
		Regressão	3	761,31	253,77	237,02
90	2,3	Resíduo	2072	2218,35	1,07	
		Total	2075	2979,66		
		Regressão	3	1090,24	363,41	476,24
90	5,0	Resíduo	1318	1005,76	0,76	
		Total	1321	2096,00		
		Regressão	3	934,12	311,37	342,01
110	2,3	Resíduo	715	650,94	0,91	
		Total	718	1585,06		
		Regressão	4	1917,67	479,42	703,60
110	5,0	Resíduo	441	300,49	0,68	
		Total	445	2218,16		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = F calculado; TDAL = variação da temperatura na pilha de madeira.

TABELA A7 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DA MADEIRA E TEOR DE UMIDADE PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR

TS	V	FV	GL	SQ	QM	F
		Regressão	2	1042,01	521,01	10532,670
50	2,3	Resíduo	2975	147,16	0,05	
		Total	2977	1189,17		
		Regressão	3	506,37	168,79	1939,499
50	5,0	Resíduo	3156	274,66	0,09	
		Total	3159	781,03		
		Regressão	3	336.71	112,23	496,038
70	2,3	Resíduo	2271	513,84	0,23	
		Total	2274	850,55		
		Regressão	2	561,25	280,62	1624,835
70	5,0	Resíduo	1721	297,23	0,17	
		Total	1723	858,48		
		Regressão	3	3087,95	1029,32	4233,839
90	2,3	Resíduo	2017	490,36	0,24	
		Total	2020	3578,31		
		Regressão	3	683,34	227,78	2535,343
90	5,0	Resíduo	1277	114,73	0,09	
		Total	1280	798,07		
		Regressão	4	20239,89	5059,97	17170,94
110	2,3	Resíduo	714	210,40	0,29	
		Total	718	20450,29		
		Regressão	4	6193,00	2029,69	5085,815
110	5,0	Resíduo	384	116,90	0,30	
		Total	388	6309,90		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado.

TABELA A8 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE TEMPERATURA DA MADEIRA/TEMPERATURA DO BULBO ÚMIDO E O TEOR DE UMIDADE PARA QUATRO TEMPERATURA DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR

TS	V	FV	GL	SQ	QM	F
		Regressão	3	97,55	32,52	36373,51
50	2,3	Resíduo	3023	2,70	0,0009	
		Total	3026	100,25		
		Regressão	3	166,27	55,42	24860,54
50	5,0	Resíduo	3151	7,02	0,002	
		Total	3154	173,29		
		Regressão	3	50,55	16,85	15275,70
70	2,3	Resíduo	2740	3,02	0,001	
		Total	2743	53,57		
		Regressão	3	71,50	23,83	11933,33
70	5,0	Resíduo	1766	3,53	0,002	
		Total	1769	75,03		
		Regressão	3	27,36	9,12	12917,78
90	2,3	Resíduo	2032	1,43	0,0007	
		Total	2035	28,79		
		Regressão	3	18,95	6,32	7498,60
90	5,0	Resíduo	1303	1,10	0,0008	
		Total	1306	20,05		
		Regressão	3	23,06	7,69	12195,42
110	2,3	Resíduo	711	0,45	0,0006	
		Total	714	23,51		
		Regressão	3	14,56	4,85	3826,69
110	5,0	Resíduo	442	0,56	0,001	
		Total	445	15,12		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado.

TABELA A9 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE TEMPERATURA DA MADEIRA/TEMPERATURA DO BULBO ÚMIDO E O TEOR DE UMIDADE PARA QUATRO TEMPERATURA DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR, NA FAIXA ENTRE PSFt E 10%

TS	V	FV	GL	SQ	QM	F
		Regressão	3	1,79	0,597	1354,87
50	2,3	Resíduo	757	0,33	0,0004	
		Total	760	2,12		
		Regressão	3	14,03	4,68	3140,66
50	5,0	Resíduo	938	1,40	0,001	
		Total	941	15,43		
		Regressão	3	7,74	2,58	569,61
70	2,3	Resíduo	469	2,12	0,004	
		Total	472	9,86		
		Regressão	3	10,62	3,54	706,65
70	5,0	Resíduo	499	2,50	0,005	
		Total	512	13,12		
		Regressão	3	5,70	1,90	803,08
90	2,3	Resíduo	356	0,84	0,002	
		Total	359	6,54		
		Regressão	3	4,05	1,35	492,17
90	5,0	Resíduo	264	0,72	0,002	
		Total	267	4,77		
		Regressão	3	1,84	0,61	919,30
110	2,3	Resíduo	226	0,15	0,0007	
		Total	229	1,99		
		Regressão	3	3,14	1,05	415,57
110	5,0	Resíduo	145	0,37	0,002	
		Total	148	3,51		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado; PSFt = ponto de saturação das fibras teórico.

TABELA A10 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA E TEOR DE UMIDADE PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR NA FAIXA ENTRE O PSFt E 10% DE UMIDADE

TS	V	FV	GL	SQ	QM	F
		Regressão	1	2150,96	2150,96	18863,1
50	2,3	Resíduo	768	87,57	0,114	
		Total	769	2238,53		
		Regressão	1	1051,43	1051,43	16705,7
50	5,0	Resíduo	775	48,78	0,063	
		Total	776	1100,20		
		Regressão	1	1232,32	1232,32	18442,0
70	2,3	Resíduo	486	32,47	0,067	
		Total	487	1264,79		
		Regressão	1	1056,22	1056,22	18465,6
70	5,0	Resíduo	501	28,65	0,057	
		Total	502	1084,87		
		Regressão	1	1044,75	1044,75	26061,1
90	2,3	Resíduo	340	13,63	0,04	
		Total	341	1058,38		
		Regressão	1	363,09	363,09	6964,4
90	5,0	Resíduo	279	14,54	0,0521	
		Total	280	377,63		
		Regressão	1	107,16	107,16	8108,9
110	2,3	Resíduo	237	3,13	0,0132	
		Total	238	110,29		
		Regressão	1	230,91	230,91	12957,9
110	5,0	Resíduo	147	2,62	0,0178	
		Total	148	233,53		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado; PSFt = ponto de saturação das fibras teórico.

TABELA A11 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: MODELOS DE REGRESSÃO ESTIMADORES DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA A PARTIR DA TDAL PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR.

TS	V	FV	GL	SQ	QM	F
		Regressão	4	2501350	625337,4	4542,0
50	2,3	Resíduo	3053	420336	137,7	
		Total	3057	2921685		
		Regressão	4	2335813	583953,3	4239,6
50	5,0	Resíduo	3189	439248	137,7	
		Total	3193	2775061		
		Regressão	4	1283471	320867,7	1741,1
70	2,3	Resíduo	2322	427926	184,3	
		Total	2326	1711396		
		Regressão	4	1150822	287705,6	3348,3
70	5,0	Resíduo	1803	154923	85,9	
		Total	1807	1305745		
		Regressão	4	747673,6	186918,4	1903,0
90	2,3	Resíduo	2071	203423,0	98,2	
		Total	2075	951096,6		
		Regressão	4	647773,9	161943,5	2050,5
90	5,0	Resíduo	1317	104013,8	79,0	
		Total	1321	751787,8		
		Regressão	4	405747,3	101436,8	1442,4
110	2,3	Resíduo	714	50213,6	70,3	
		Total	718	455960,9		
		Regressão	4	267854,3	66963,5	4193,0
110	5,0	Resíduo	441	7042,9	15,97	
		Total	445	274897,2		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado; TDAL = variação da temperatura na pilha de madeira.

TABELA A12 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: MODELOS DE REGRESSÃO ESTIMADORES DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA TEMPERATURA DA MADEIRA PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR.

TS	V	FV	GL	SQ	QM	F
		Regressão	2	2565908	1282954	39040,9
50	2,3	Resíduo	2975	97764	33	
		Total	2977	2663671		
		Regressão	2	2333093	1166546	11466,4
50	5,0	Resíduo	3157	321181	102	
		Total	3159	2654274		
		Regressão	2	1381060	690530	8162,3
70	2,3	Resíduo	2272	192212	84,6	
		Total	2274	1573272		
		Regressão	2	982269	491134,3	7517,8
70	5,0	Resíduo	1721	112432	65,3	
		Total	1723	1094700		
		Regressão	2	812999,3	406499,6	17863,0
90	2,3	Resíduo	2018	45922,3	22,8	
		Total	2020	858921,6		
		Regressão	2	600124,4	300062,2	6034,8
90	5,0	Resíduo	1278	63545,0	49,7	
		Total	1280	663669,4		
		Regressão	4	431988,3	107997,1	3216,6
110	2,3	Resíduo	714	23972,5	33,6	
		Total	718	455960,8		
		Regressão	4	144245,0	36061,2	1070,0
110	5,0	Resíduo	384	12941,6	33,7	
		Total	388	157186,6		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado.

TABELA A13 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: MODELOS DE REGRESSÃO ESTIMADORES DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA RELAÇÃO TEMPERATURA DA MADEIRA/TEMPERATURA DO BULBO ÚMIDO PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADES DE AR.

TS	V	FV	GL	SQ	QM	F
		Regressão	5	2771183	554236,6	33849,3
50	2,3	Resíduo	3021	49465	16,4	
		Total	3026	2820648		
		Regressão	4	2403742	600935,5	8122,9
50	5,0	Resíduo	3150	233037	74,0	
		Total	3154	2636779		
		Regressão	5	1333677	266735,3	6424,6
70	2,3	Resíduo	2206	91589	41,5	
		Total	2211	1425265		
		Regressão	5	1172984	234596,7	13066,1
70	5,0	Resíduo	1764	31672	18,0	
		Total	1769	1204656		
		Regressão	5	856403,8	171280,8	14090,2
90	2,3	Resíduo	2030	24676,6	12,2	
		Total	2035	881080,4		
		Regressão	5	694059,1	138811,8	8395,9
90	5,0	Resíduo	1301	21509,7	16,5	
		Total	1306	715568,8		
		Regressão	5	437561,9	87512,4	9308,8
110	2,3	Resíduo	709	6665,3	9,4	
		Total	714	444227,2		
		Regressão	5	262430,3	52486,0	1852,4
110	5,0	Resíduo	440	12466,9	28,3	
		Total	445	274897,2		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado.

TABELA A14 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: MODELOS DE REGRESSÃO LINEARES PARA ESTIMAR O TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADE DE AR

TS	V	FV	GL	SQ	QM	F
		Regressão	2	312390,73	156195,37	133456
50	2,3	Resíduo	768	898,86	1,17	
		Total	770	313289,59		
		Regressão	2	329593,39	164796,70	122410
50	5,0	Resíduo	775	1043,36	1,35	
		Total	777	330636,75		
		Regressão	2	246817,93	123408,97	128612
70	2,3	Resíduo	486	466,34	0,96	
		Total	488	247284,27		
		Regressão	2	203796,04	101898,02	62398
70	5,0	Resíduo	501	818,14	1,63	
		Total	503	204614,18		
		Regressão	2	162491,73	81245,86	95079
90	2,3	Resíduo	340	290,53	0,85	
		Total	342	162782,26		
		Regressão	2	139024,16	69512,08	19627
90	5,0	Resíduo	279	988,11	3,54	
		Total	281	140012,27		
		Regressão	2	109129,71	54564,86	25835
110	2,3	Resíduo	237	500,56	2,11	
		Total	239	109630,27		
		Regressão	2	62950,97	31475,49	113055
110	5,0	Resíduo	147	40,93	0,28	
		Total	149	62991,90		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado.

TABELA A15 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: MODELOS DE REGRESSÃO MULTIPLICATIVOS PARA ESTIMAR O TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADE DE AR.

TS	V	FV	GL	SQ	QM	F
		Regressão	2	311602,19	155801,09	70911
50	2,3	Resíduo	768	1687,40	2,20	
		Total	770	313289,59		
		Regressão	2	323314,25	164657,13	96491
50	5,0	Resíduo	775	1322,50	1,70	
		Total	777	330636,75		
		Regressão	2	246188,87	123094,43	54613
70	2,3	Resíduo	486	1095,40	2,25	
		Total	488	247284,27		
		Regressão	2	204317,95	102158,98	172779
70	5,0	Resíduo	501	296,22	0,59	
		Total	503	204614,17		
		Regressão	2	162667,56	81333,78	241089
90	2,3	Resíduo	340	114,70	0,34	
		Total	342	162782,26		
		Regressão	2	139573,47	69786,73	44372
90	5,0	Resíduo	279	438,80	1,57	
		Total	281	140012,27		
		Regressão	2	109439,55	54719,77	67998
110	2,3	Resíduo	237	190,72	0,80	
		Total	239	109630,27		
		Regressão	2	62783,59	31391,80	22153
110	5,0	Resíduo	147	208,31	1,42	
		Total	149	62991,90		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado.

TABELA A16 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA: MODELOS DE REGRESSÃO EXPONENCIAIS PARA ESTIMAR O TEOR DE UMIDADE A PARTIR DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MADEIRA PARA QUATRO TEMPERATURAS DE SECAGEM E DUAS VELOCIDADE DE AR.

TS	V	FV	GL	SQ	QM	F
		Regressão	3	312381,74	104127,25	87912
50	2,3	Resíduo	767	907,85	1,18	
		Total	770	313289,59		
		Regressão	3	329623,98	109874,66	83970
50	5,0	Resíduo	774	1012,77	1,31	
		Total	777	330636,75		
		Regressão	3	246810,18	82270,09	84181
70	2,3	Resíduo	485	473,99	0,98	
		Total	488	247284,27		
		Regressão	3	204322,94	68107,65	116927
70	5,0	Resíduo	500	291,24	0,58	
		Total	503	204614,18		
		Regressão	3	162673,03	54224,34	168283
90	2,3	Resíduo	339	109,23	0,32	
		Total	342	162782,26		
		Regressão	3	139734,92	46578,31	46687
90	5,0	Resíduo	278	277,35	0,998	
		Total	281	140012,27		
		Regressão	3	109446,80	36482,27	46927
110	2,3	Resíduo	236	183,47	0,777	
		Total	239	109630,27		
		Regressão	3	62949,95	20983,32	73027
110	5,0	Resíduo	146	41,95	0,287	
		Total	149	62991,90		

onde: TS = temperatura de secagem (°C); V = velocidade do ar (m/s); FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAPOV, V.P. Accuracy of estimating moisture content of sawn timber stacks during drying on the basis of stack weight. **Derev. Prom.,** Moscow, n. 3, p. 5-7, 1977. **Forest Prod. Abstracts**, Farnham Royal, v. 3, n. 8, p. 205, 1980. Ref. 2004. Resumo.

ANTTI, A.L. Microwave drying of hardwood: simultaneous measurements of pressure, temperature, and weight reduction. **For. Prod. J.,** Madison, v. 42, n. 6, p. 49-54, June. 1992.

ARGANBRIGHT, D.G. State-of-the-Art Report: Developments in applied drying technology, 1971-1977. **For. Prod. J.**, Madison, v. 29, n. 12, p. 14-20, 1979.

BACHRICH, J.L. **Dry kiln handbook.** Vancouver : Simons, 1980. 374p.

BAI, G.L.; GARRAHAN, P. The temperature and moisture content in lumber during preheating and drying. **Wood Sci. Technol.,** New York, v. 18, n. 2, p. 121-135, 1984.

BANKS, C.H. Solar drying of timber - a development study. **CSIR Subject Survey O/Hout** 10, Pretoria, 1969. 27p.

BEARD, J.N.; ROSEN, H.N.; ADESANYA, B.A. Temperature distribution in lumber during impingement drying. **Wood Sci. Technol.,** New York, v. 19, n. 3, p. 277-286, 1985.

BECKER, H.F. Acoustic emissions during wood drying. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 40, n. 9, p. 345-350, 1982.

BEL'KEVICH, E.M. Control of moisture content of lumber during chamber drying based on stack shrinkage. **Derev. Prom.,** Moscow, n. 11, p. 6-8, 1975. **For. Abstr.,** Farnham Royal, v. 37, n. 8, p. 479, Aug.1976. Ref. 5311. Resumo.

BERNATOWICZ, G. et al. Untersuchungen zur analyse von schallsignalen bei der holztrocknung. **Holzforsch. Holzverwert.**, Germany, v. 43, n. 5, p. 99-100, 1991. **For. Prod. Abstr.,** Farnham Royal, v. 15, n. 5, p. 189, 1992. Ref. 1512. Resumo.

BOGDANOV, E.S.; ISAKOV, A.I. Analysis of system for monitoring the moisture of lumber during drying by the shrinkage of the stack. **Derev. Prom.,** Moscow, v. 21, n. 3, p. 8-10, 1972. **For. Abstr.,** Farnham Royal, v. 33, n. 4, p. 821, Oct. 1972. Ref. 7082. Resumo.

BOGDANOV, E.S.; RYABOKOBYLENKO, I.G.; YANKOVSKII, L.A. Method of predicting the moisture content of lumber during drying by the weight of the stack. **Lesnol Zhurnal**, Russia, n. 3, p. 80-84, 1989. **For. Prod. Abstr.**, Farmham Royal, v. 17, n. 5, p. 208, 1994. Ref. 2078. Resumo.

BRAMHALL, G. Placing thermocouples in wood. **Wood Sci.,** Madison, v. 7, n. 2, p. 137-139, Oct. 1974.

BREINER, T.A.; ARGANBRIGHT, D.G.; PONG, W.Y. Performance of in-line moisture meters. **For. Prod. J.,** Madison, v. 37, n. 4, p.9-16, Apr. 1987.

BROWN, H.P.; PANSHIN, A.J.; FORSAITH, C.C. **Textbook of wood technology -II. the physical, mechanical, and chemical properties of the commercial woods of the United States**. New York : McGraw-Hill, 1952. 783p.

BROWN, N.C.; BETHEL, J.S. El secado de la madera. In:_____. **La industria maderera**. México : Limusa, 1975. p. 179-234.

BRUNNER, R. Current control techniques for timber drying. 3. Computerized control. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 39, n. 1, p. 11-15, Jan. 1981.

BRUNNER, R. Timber seasoning using the latest computer technology. **Holz-Zentralblatt** v. 111, n. 58, 59,61, p. 909-910, 932-933, 1985. **For. Prod. Abstr.,** Farnham Royal, v. 8, n. 8, p. 243, 1985. Ref. 2003. Resumo.

CECH, M.Y.; PFAFF, F. **Kiln operator's manual Eastern Canada.** Ontário :Eastern Forest Products Laboratory, 1977. 189p.

CHEN, P.Y.S. et al. Experimental solar-dehumidifier kiln for drying lumber. **For. Prod. J.,** Madison, v. 32, n. 9, p. 35-41, Sept. 1982.

CHEN, Z.; WENGERT, E.M.; LAMB, F.M. A technique to electrically measure the moisture content of wood above fiber saturation. **For. Prod. J.**, Madison, v. 44, n. 9, p. 57-62, Sept. 1994.

COUTURE, R.F.; HILL, J.L. Improved resistance moisture measurement techniques: pulsed current meter and wood element sensors. **For. Prod. J.,** Madison, v. 24, n. 4, p. 17-23, Apr. 1974.

DAVIS, J.R.; ILIC, J.; WELLS, P. Moisture content in drying wood using direct scanning gamma-ray densitometry. **Wood Fiber Sci.,** Madison, v. 25, n. 2, p. 153-162, 1993.

ECKELMAN, C.A.; BAKER, J.L. Heat and air requirements in the kiln drying of wood. **Research Bulletin**, Purdue University, Agric. Exp. Station, West Lafayette, n. 933, p. 1-19, Mar. 1976.

FELL, J.D.; HILL, J.L. Sampling levels for hardwood kiln drying control. **For. Prod. J.,** Madison, v. 30, n. 3, p. 32-40, Mar. 1980.

FORRER, J.B. An electronic system for monitoring gradients of drying wood. **For. Prod. J.,** Madison, v. 34, n. 7/8, p. 34-38, July/Aug. 1984.

FORRER, J.B.; VERMAAS, H.F. Development of an improved moisture meter for wood. **For. Prod. J.,** Madison, v. 37, n. 2, p. 67-71, Feb. 1987.

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira.** São Paulo : Nobel, 1985. 111p.

GARRAHAN, P. et al. Taking the air out of kiln drying costs. **Can. Wood Prod.,** Montreal, p. 24-25, 1993.

HART, C.A. The drying of wood. **Extension Report**, North Carolina Agric. Ext. Serv., Raleigh, N.C., n. 27, p. 1-24, 1965.

HERZBERG, B.L.; TAYLOR, F.W.; ROSEN, H.N. Factors that affect the time required to high-temperature dry pine dimension lumber. **For. Prod. J.,** Madison, v. 35, n. 7/8, p. 34-36, July/Aug. 1985.

HILDEBRAND, R. **Kiln drying of sawn timber**. Germany, R.H.: Maschinenbau Gmbh, 1970. 204p.

HILL, J.L.; MUNKITTRICK, R.H. Performance of remote moisture sensing devices. **For. Prod. J.,** Madison, v. 20, n. 8, p. 39-46, Aug. 1970.

HOLMES, S. A shopper's guide to electronic kiln controls. **For. Ind.,** San Francisco, v. 115, n. 7. p. T10-T14, July 1988a.

HOLMES, S. Sensor type and placement for measurement of internal temperature in dry kilns. **For. Prod. J.,** Madison, v. 38, n. 10, p. 69-71, Oct. 1988b.

HOLMES, S.; ARGANBRIGHT, D.G. Drying tests with a weight-actuated lumber drying control system. **For. Prod. J.,** Madison, v. 26, n. 11, p. 31-39, Nov. 1976.

HOLMES, S.; FORRER, J. Lumber moisture content and temperature changes with kiln conditions. **For. Prod. J.**, Madison, v. 39, n. 4, p. 67-70, Apr. 1989.

HONEYCUTT, R.M.; SKAAR, C.; SIMPSON, W.T. Use of acoustic emissions to control drying rate of red oak. **For. Prod. J.,** Madison, v. 35, n. 1, p. 48-50, Jan. 1985.

JAI, S.Y. & HSIUNG, J.C. Relationships among the temperatures of lumber-center and kiln-air and moisture content changes during high-temperature kiln drying (2). **Bulletin of the Taiwan Forestry Research Institute**, Taipei, v. 10, n. 2, p. 137-144, 1995. **For. Prod. Abstr.**, Farnham Royal, v. 19, n. 2. p. 73, 1996. Ref. 664. Resumo.

JAMES, W.L. Calibration of electric moisture meters for some wood species grown in Hawaii. **Research Note,** FPL. USDA For. Serv., Madison, n. 61, p. 1-25, Oct. 1964.

JAMES, W.L. Effect of temperature on readings of electric moisture meters. **For. Prod. J.**, Madison, v. 18, n. 10, p. 23-31, Oct. 1968.

JAMES, W.L. Effects of wood preservatives on electric moisture-meter readings. **Research Note,** FPL. USDA For. Serv., Madison, n. 106, p. 1-20, Aug. 1966.

JAMES, W.L. Fundamentals of hand held moisture meters: an outline. In: ASTM HAND-HELD MOISTURE METER WORKSHOP (1993 : Madison). **Proceedings.** Madison, 1994. p. 13-16.

JAMES, W.L.; BOONE, R.S. Capacitive in-kiln wood moisture content monitors: principles of operation and use. **Wood Sci.,** Madison, v. 14, n. 4, p. 146-164, Apr. 1982.

JAMES, W.L.; BOONE, R.S.; GALLIGAN, W.L. Using speed of sound in wood to monitor drying in kiln. **For. Prod. J.,** Madison, v. 32, n. 9, p. 27-34, Sept. 1982.

JAMES, W.L. et al. Moisture levels and gradients in commercial softwood dimension lumber shortly after kiln-drying. **For. Prod. J.**, Madison, v. 34, n. 11/12, p. 59-64, Nov/Dec. 1984.

JANKOWSKY, I.P. et al. Estimativas de umidade de equilíbrio para cidades da região sul do Brasil. **IPEF,** Piracicaba, n. 32, p. 61-64, abril 1986.

KARAVAEVA, N.M. et al. Automated technological process control system for kiln seasoning of lumber. **Derev. Prom.,** Moscow, n. 12, p. 12-14, 1987. **For. Prod. Abstr.,** Farnham Royal, v. 12, n. 7, p. 150, 1989. Ref. 1241. Resumo.

KAVVOURAS, P.K.; SKARVELIS, M.A. Computerized control system for an experimental solar lumber dryer. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 51, n. 4, p. 267-271, 1993.

KEYLWERTH, R. Der verlauf der holz-temperatur während der Furnier-und schnittholztrocknung. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 10, n. 3, p. 87-91, 1952. **For. Abstr.,** Farnham Royal, v. 13, n. 5, p. 553, Okt. 1952. Ref. 4287. Resumo.

KEYLWERTH, R.; GAISER, H.; MEICHSNER, H. Untersuchungen an einer Heissdampftrockenanlage. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 13, n. 1, p. 5-20, 1955. **For. Abstr.,** Farnham Royal, v. 17, n. 2, p. 288, 1956. Ref. 2168. Resumo.

KEYLWERTH, R.; NOACK, D. The effect of elevated temperatures on the measurement of the moisture content of wood by the electric-resistance method. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 14, n. 5, p. 162-172, 1956. **For. Abstr.,** Farnham Royal, v. 19, n. 4, p. 593, 1958. Ref. 4765. Resumo.

KININMONTH, J.A. Changes in timber drying methods in New Zealand (1960 to 1975). **For. Ind. Rev.,** New Zealand, v. 6, n. 11, p. 3,5,9, 1975. **For Abstr.,** Farnham Royal, v. 37, n. 8, p. 486, Aug. 1976. Ref. 5390. Resumo.

KOCH, P. Utilization of the Southern Pines - II. Processing. **Agric. Handb.,** Washington, n. 420, p. 949-1036, 1972.

KOCH, P. Time to dry 2-, 3-, and 4-inch S4s Southern Pine at 240°F, as related to board width. **For. Prod. J.,** Madison, v. 24, n. 3, p. 35-39, Mar. 1974.

KOCH, P.; WELLFORD,Jr, W.L. Continuous tunnel kiln direct-fired with bark to dry 1.75-inch Southern Pine in 12 hours. **For. Prod. J.,** Madison, v. 27, n. 5, p. 39-47, May. 1977.

KOLLMANN, F.F.P. **Tecnologia de la madera y sus aplicaciones.** 2 ed. Madrid : Gráficas Reunidas, 1959. 675p

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ Jr, W.A. **Principles of wood science and technology - I. solid wood**. New York : Springer-Verlag, 1968. 592p.

KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.; STAMM, A.J. **Principles of wood science and technology - II. wood based materials**. Berlin : Springer-Verlag, 1975. 703p.

KOLLMANN, F.F.P.; SCHNEIDER, A. Der Einfluss der Belüftungsgeschwindigkeit auf die Trocknung von Schnittholz mit Heissluft-Dampf-Gemischen. **Holz Roh-Werkstoff**, Berlin, v. 13, n. 3, p. 81-94, 1960. **For. Abstr.**, Farnham Royal, v. 21, n. 4, p. 669-670, 1960. Ref. 5085. Resumo.

KORDES, W. Current control techniques for timber drying. 1. Drying techniques and measurement of control data. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 38, n. 11, p. 419-422, Nov. 1980a.

KORDES, W. Current control techniques for timber drying. 2. Conventional control devices. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 38, n. 12, p. 445-48, Dec. 1980b.

KOTOK, E.S.; LOWERY, D.P.; JENSEN, C.E. Surface temperature as an indicator of wood moisture content during drying. **For. Prod. J.,** Madison, v. 19, n. 9, p. 80-82, Sept. 1969.

KOZLIK, C.J. Electrical moisture meter readings on western hemlock dimension lumber. **For. Prod. J.**, Madison, v. 21, n. 6, p. 34-35, June. 1971.

KUUN, C.P.; VERMAAS, H.F. Computerized data-acquisition and control system for an experimental pressure steam dryer for lumber. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 47, n. 7, p. 261-265, July 1989.

KUUN, C.P.; VERMAAS, H.F. The supervisory PC in process control system with special reference to the kiln drying of wood. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 46, n. 1, p. 27-31, Jan. 1988.

LANGRISH, T.A.G.; WALKER, J.C.F. Transport process in wood. In: WALKER, J.C.F. et al. **Primary wood processing: principles and practice**. London : Chapman & Hall, 1993. p. 121-152.

LIN, R.T. A study on electrical conduction in wood. **For. Prod. J.**, Madison, v. 15, n. 11, p. 506-514, Nov. 1965.

LIN, R.T. Review of the electrical properties of wood and cellulose. **For. Prod. J.**, Madison, v. 17, n. 7, p. 54-61, July 1967.

LITTLE, R.L.; MOSCHLER, W.W.; TOENNISSON, R.L. Design of a computer based controller-recorder for an experimental dry kiln. **For. Prod. J.**, Madison, v. 36, n. 11/12, p. 72-74, Nov/Dec. 1986.

LOWERY, D.P.; KRIER, J.P.; HANN, R.A. High-temperature drying of lumber-a review. **Research Paper**, INT. USDA For. Serv., Ogden, Utah, n. 48, p. 1-10, 1968.

LUM, C. Practical moisture and species correction tables. In: ASTM HAND-HELD MOISTURE METER WORKSHOP (1993 : Madison). **Proceedings.** Madison, 1994. p. 23-28.

MACKAY, J.F.G. Delayed shrinkage after surfacing of high-temperature kiln-dried northern aspen dimension lumber. **For. Prod. J.**, Madison, v. 26, n. 2, p. 33-36, Feb. 1976a.

MACKAY, J.F.G. Effect of moisture gradients on the accuracy of power-loss moisture meters. **For. Prod. J.**, Madison, v. 26, n. 3, p. 49-52, Mar. 1976b.

MACKAY, J.F.G. High-temperature kiln-drying of northern aspen 2-by 4-inch light-framing lumber. **For. Prod. J.**, Madison, v. 24, n. 10, p. 32-35, Oct. 1974.

MACKAY, J.F.G. Kiln drying advances in western Canada. **For. Ind.**, San Francisco, v. 115, n. 7, p. T22-T24, July 1988.

MACKAY, J.F.G.; OLIVEIRA, L.C. **Kiln operator's handbook for Western Canada**. Vancouver, Forintek Canada Corp. 1989. 61p. (Special Publication No. SP-31).

MALMQUIST, L.; MEICHSNER, H. On heat transfer in the convection drying of wood in superheated steam. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 22, n. 3, p. 95-106, 1964. **For. Abstr.,** Farnham Royal, v. 26, n. 1, p. 156, Jan. 1965. Ref. 1428. Resumo.

MASPELL vacuum wood drying system. Savona, Italy : Acimall, [ca.1980]. 7p.

McCARTHY, E.T.; SMART, W.A. Computerized veneer drying. In: PLYWOOD CLINIC, (7 : 1979 : Portland). **Proceedings.** Portland, 1979. p. 62-69.

McMILLEN, J.M.; WENGERT, E.M. Drying eastern hardwood lumber. **Agric. Handb.,** Madison, n. 528, p. 1-104, 1978.

MILLER, W. Energy conservation in timber-drying kilns by vapor recompression. **For. Prod. J.,** Madison, v. 27, n. 9, p. 54-58, Sept. 1977.

MILOTA, M.R. Correction factors for moisture-meter measurements of jelutong (*Dyera costulata*). **For. Prod. J.**, Madison, v. 41, n. 2, p. 49-50, Feb. 1991.

NANASSY, A.J. Use of wide line NMR for measurement of moisture content in wood. **Wood Sci.,** Madison, v. 5, n. 3, p. 187-193, Jan. 1973.

NEVILLE, C.J.; VERMAAS, H.F. Laboratory kiln for the development of low temperature wood drying schedules. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 46, n. 7, p. 269-273, July 1988.

NEW system dries wood faster, uses less energy. **World Wood,** San Francisco, v. 27, n. 4, p. 54, Aug. 1986.

NOGUCHI, M.; KAGAWA, Y.; KATAGIRI, J. Acoustic emission generation in the process of drying hardwood. **J. JPN Wood Res. Soc.,** Tokyo, v. 29, n. 1, p. 20-23, 1983. **For. Prod. Abstr.,** Farnham Royal, v. 8, n. 1, p. 16, 1985. Ref. 127. Resumo.

NOGUCHI, M. et al. Feedback control for drying *Zelkova serrata* using in-process acoustic emission monitoring. **For Prod. J.,** Madison, v. 37, n. 1, p. 28-34, Jan. 1987.

NOGUCHI, M.; OKUMURA, S.; KAWAMOTO, S. Characteristics of acoustic emissions during wood drying. **J. JPN Wood Res. Soc.,** Tokyo, v. 31, n. 3, p. 171-175, 1985. **For. Prod. Abstr.,** Farnham Royal, v. 11, n. 10, p. 223, 1988. Ref. 1920. Resumo.

OLIVEIRA, L.C. **Comentários e opiniões sobre o conceito TDAL.** Vancouver : Forintek Canada Corporation, 1995. (Carta datada de 21 mar. 1995).

PANOW, S.; NESTER, M.R. Drying and point determination during high-temperature drying. **For. Prod. J.,** Madison, v. 35, n. 10, p. 51-55, Oct. 1985.

PANOW, S.; NESTER, M.R. Some moisture content/temperature/time relationships for individual timber specimens during high temperature drying. **Research Note,** Dep. of Forestry Queensland, Queensland, n. 39, p. 1-10, 1984.

PLUMPTRE, R.A. Solar drying kilns for sawnwood. **For. Prod. Abstr.,** Farnham Royal, v. 8, n. 2, p. 33-45, 1985.

PRICE, E.W.; KOCH, P. A note on effects of kiln stick thickness and air velocity on drying time of southern pine 2 by 4 and 2 by 6 lumber. **Wood Fiber Sci.,** Madison, v. 13, n. 2, p. 115-119, 1981.

QUARLES, S.L.; BREINER, T.A. Operational characteristics of a capacitive-admittance type in-kiln moisture meter. **For. Prod. J.**, Madison, v. 42, n. 3, p. 15-22, 1992.

QUARLES, S.L.; WENGERT, E.M. Applied drying technology, 1978 to 1988. **For. Prod. J.,** Madison, v. 39, n. 6, p. 25-38, June. 1989.

RASEV, A.I.; PETROPAVLOVSKIJ, N.S. Monitoring the moisture content of lumber, during drying, by the shrinkage of the kiln charge. **Derev. Prom.,** Moscow, v. 18, n. 9, p. 2-4, 1969. **For. Abstr.,** Farnham Royal, v. 31, n. 2, p. 419, Apr. 1970. Ref. 3566. Resumo.

RASMUSSEN, E.F. Dry kiln operator's manual. **Agric. Handb.,** Madison, n. 188, p. 1-197, 1961.

RHEMREV, J. et al. The development of a longitudinal "moisture gradient" meter for pencil slats. **For. Prod. J.,** Madison, v. 41, n. 4, p. 58-62, Apr. 1991.

SALAMON, M. High-temperature drying on its effect on wood properties. **For. Prod. J.,** Madison, v. 19, n. 3, p. 27-34, Mar. 1969.

SALAMON, M.; MCINTYRE, S. Manipulation of air velocity permits drying time savings. **Can. For. Ind.**, Ontario, v.89, n. 9, p. 49-53, 55-57, Sept. 1969.

SANTINI, E.J. Influência da temperatura na taxa de secagem e contração da madeira de *Pinus elliottii* proveniente de plantios de rápido crescimento. **Série Técnica**, Universidade Federal do Paraná, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, Curitiba, n. 5, p. 1-15, dez. 1980.

SANTINI, E.J. Secagem de madeira serrada em estufa solar e sua comparação com os métodos convencionais. **Rev. Floresta,** Curitiba, v. 14, n. 2, p. 61-70, 1983.

SCHNEIDER, A. Zur Konvektionstrocknung von Schnittholz bei extrem hohen Temperaturen. Erste Mitteilung: Trocknungs-verlauf und Brettemperaturen bei Trocknungstemperaturen von 110 bis 180°C. **Holz Roh-Werkstoff**, Berlin, v. 30, n. 10, p. 382-394, Okt. 1972.

SCHNEIDER, A.; ENGELHARDT, F.; WAGNER, L. Vergleichende Untersuchungem über die Freilufttrocknung und solartrocknung von Schnittholz unter mitteleuropäischen Wetterverhältnissen. Teil 1: Versuchsanlage und Ergebnisse der ersten Trocknungsversuche. **Holz Roh-Werkstoff**, Berlin, v. 37, n. 11, p. 427-433, Nov. 1979.

SHARMA, N.S. Solar timber drying. In: SEMINAR ON INDUSTRIAL APPLICATION OF SOLAR ENERGY. (1975 : Madras). **Proceedings**. p. 1-6.

SHEKHTOV, K.H. Automatic regulator for drying wood according to its actual condition. **Mekhanichna Technologiya na D"rvesinata,** Sofia, n. 23, p. 203-208, 1978. **For. Prod. Abstr.,** Farnham Royal, v. 3, n. 10, p. 254, 1980. Ref. 2790. Resumo.

SIAU, J.F. **Flow in wood.** Syracuse : Syracuse University Press, 1971.131p. (Syracuse Wood Science Series, 1).

SIAU, J.F. **Transport processes in wood.** Berlin : Springer-Verlag, 1984. 245p. (Springer Series in Wood Science).

SIAU, J.F. **Wood: influence of moisture on physical properties**. Dep. of Wood Sci. and Forest Prod., Virginia Polytechnic Inst. and State University, Keene, N.Y., 1995. 227p.

SIMPSON, W.T. Dry kiln operator's manual. **Agric. Handb.,** Madison, n. 188, p. 1-274, 1991.

SIMPSON, W.T. Equilibrium moisture content prediction for wood. **For. Prod. J.,** Madison, v. 21, n. 5, p. 48-49, May. 1971.

SIMPSON, W.T.; LOEHNERTZ, S.P. Resistance moisture meter correction factor for pacific yew. **For. Prod. J.**, Madison, v. 44, n. 1, p. 63-64, Jan. 1994.

SIMPSON, W.T.; ROSEN, H.N. Equilibrium moisture content of wood at high temperatures. **Wood Fiber,** Lawrence, Kansas, v. 13, n. 3, p. 150-158, July 1981.

SKAAR, C. Some factors involved in the electrical determination of moisture gradients in wood. **For. Prod. J.**, Madison, v. 14, n. 6, p. 239-243, June 1964.

SKAAR, C. **Water in wood.** Syracuse, Syracuse University Press, 1972. 218p. (Syracuse Wood Science Series, 4).

SMITH, W.B. Determining moisture content in eastern redcedar. **For. Prod. J.**, Madison, v. 42, n. 7/8, p. 67-69, July/Aug. 1992.

SPOLEK, G.A.; PLUMB, O.A. Capillary pressure in softwoods. **Wood Sci. Technol.,** New York, n. 15, p. 189-199, 1981.

STAMM, A.J. Movements of fluids in wood. Part 2: diffusion. **Wood Sci. Technol.**, New York, n. 1, p. 205-230, 1967.

STAMM, A.J. Review of nine methods for determining the fiber saturation points of wood products. **Wood Sci.**, Madison, v. 14, n. 2, p. 114-128, 1971.

STAMM, A.J. Wood and cellulose-liquid relationships. Raleigh, North Carolina Agric. Exp. Station, 1962. 56p.

STAMM, A.J. **Wood and cellulose science**. New York : Ronald Press, 1964. 549p.

STEINHAGEN, H. Effect of kiln air velocity, at various moisture content levels on drying rate of 4/4 yellow-poplar sapwood. **For. Prod. J.,** Madison, v. 24, n. 4, p.45-47, Apr. 1974.

STEINMANN, D.E.; VERMAAS, H.F.; FORRER, J.B. Solar timber drying kilns: Part 1- Review of previous systems and control measures and description of an automated solar kiln. **J. of the Inst. of Wood Sci.,** London, v. 8, n. 6, p. 254-257, 1980.

STEINMANN, D.E.; VERMAAS, H.F.; FORRER, J.B. Solar timber drying kilns: Part 2- Microprocessor control of a solar kiln. **J. of the Inst. of Wood Sci.,** London, v. 9, n. 1, p. 27-31, 1981.

STEINMANN, D.E.; VERMAAS, H.F.; HUY, V.R. The evaluation of drying results of timber loads with different densities - a new approach. **Holzforschung**, Berlin, v. 40, n.3, p.143-148, 1986.

STEVENS, W.C.; JOHNSTON, D.D. Temperature drop across a pile of green timber and its effects on drying rate. **Timber Technol.,** [S.l.], v. 65, n. 2212, p. 73-75, 1957. **For. Abstr.**, Farnham Royal, v. 19, n. 1, p. 130, 1958. Ref. 1117. Resumo.

TAYLOR, F.W. Portable system for weighing kiln trucks. **For. Prod. J.**, Madison, v. 28, n. 9, p. 49-50, Sept. 1978.

TAYLOR, F.W.; LANDOCH, D. TDAL profiles os southern pine lumber during drying. **For. Prod. J.,** Madison, v. 40, n. 10, p. 47-50, Oct. 1990.

TAYLOR, F.W.; MITCHELL, P.H. Drying pine lumber at very high temperatures and air velocities. **Wood Fiber Sci.,** Madison, v. 19, n. 3, p. 239-245, 1987.

TOMASELLI, I. Secagem a alta temperatura e sua aplicação nas condições brasileiras. **Rev. Floresta,** Curitiba, v. 7, n. 1, p. 50-57, 1976.

TOMASELLI, I. **The influence of high-temperature drying on some physical and mechanical properties of *Pinus radiata* D. Don.** Melbourne, 1977. 264p. Thesis (Doctor of Philosophy) Faculty of Agriculture and Forestry, University of Melbourne.

TROUGHTON, G.E.; CLARKE, M.R. Development of a new method to measure moisture content in unseasoned veneer and lumber. **For. Prod. J.,** Madison, v. 37, n. 1, p. 13-19, Jan. 1987.

VENKATESWARAN, A. Effect of compression on electrical properties of wood and cellulose. **Wood Sci.,** Madison, v. 5, n. 3. p. 230-234, 1973.

VERMAAS, H.F. A summary of literature references of factors affecting moisture content determination with D.C. resistance measurements. **South Afr. For. J.,** Stellenbosch, South Africa, n. 95, p. 35-36, 1975a.

VERMAAS, H.F. D.C. resistance moisture meters for wood. Part I: Review of some fundamental considerations. **South Afr. For. J.,** Stellenbosch, South Africa, n. 121, p. 88-92, June 1982a.

VERMAAS, H.F. D.C. resistance moisture meters for wood. Part II: The influence of temperature and moisture content on the resistance of two South African Pines. **South Afr. For. J.,** Stellenbosch, South Africa, n. 122, p. 70-81, 1982b.

VERMAAS, H.F. Experimental variables affecting the measurement of the DC resistance of wood. **Holzforschung,** Berlin, v. 29, n. 4, p. 140-144, Aug. 1975b.

VERMAAS, H.F. Fundamentals of superheated steam and superheated vapour drying. **South Afr. For. J.,** Stellenbosch, South Africa, n. 142, p. 17-23, 1987.

VERMAAS, H.F. Measuring the relative humidity of dry kiln air above 100°C. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 43, n. 6, p. 237-241, June 1985.

VERMAAS, H.F. Relative humidity determination by wet-dry bulb psychrometer - a review of principles and precautions. **Communication,** Stellenbosch, n. 87, p. 1-4, 1979.

VERMAAS, H.F.; NEVILLE, C.J. Low temperature drying of *Eucalyptus grandis*. A preliminary laboratory evaluation. **Holzforschung,** Berlin, v. 42, n. 4, p. 265-271, Aug. 1988.

VILLIERE, A. **Séchage des bois.** 6.ed. Paris : Dunod, 1966. 410p.

VITAL, B.R.; COLLON, J.L. **Secador solar para madeira.** Viçosa, MG : Imprensa Universitária da Universidade Federal de Viçosa, 1974.

VRANIZAN, J.M.; WOHLGEMUTH, C.W. Conserving electricity in lumber dry kilns. **For. Ind.,** San Francisco, v. 115, n. 7, p. T28-T30, July 1988.

WALKER, J.C.F. The drying of timber. In: WALKER, J.C.F. et al. **Primary wood processing: principles and practice.** London : Chapman & Hall, 1993. p. 247-284.

WANGAARD, F.F. Heat transmissivity of southern pine wood, plywood, fiberboard and particleboard. **Wood Sci.,** Madison, v. 2, n. 1, p.54-60, July 1969.

WELLING, J.; RESSEL, J. Computergesteuertes datenerfassungssystem für die schnittholztrocknung. **Holz Roh-Werkstoff,** Berlin, v. 43, n. 4, p. 131-134, Apr. 1985.

WENGERT, E.M. Improvements in solar dry kiln design. **Research Note,** FPL. USDA For. Serv., Madison, n. 212, p. 1-10, 1971.

WENGERT, E.M. Technology helps pinpoint lumber moisture content. **For. Ind.,** San Francisco, CA, v. 119, n. 3, p. 19-20, May/June 1992.

WENGERT, E.M.; DENIG, J. Lumber drying - today and tomorrow. **For. Prod. J.,** Madison, v. 45, n. 5, p. 22-30, May 1995.

WENGERT, E.M.; EVANS, P.G. Automatic programming and control for steam-heated lumber dry kilns. **For. Prod. J.,** Madison, v. 21, n. 2, p. 56-59, Feb. 1971.

ZIEGLER, G.A. Addressing the basics of successful lumber drying. **For. Ind.,** San Francisco, v. 115, n. 7, p. T6-T8, July 1988.