

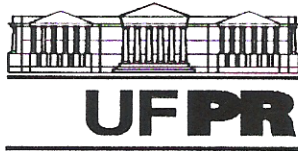
RICARDO JORGE KLITZKE

# **USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NA SECAGEM DE MADEIRA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de “Doutor em Ciências Florestais”.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Graciela Inez Bolzon de Muñiz

CURITIBA  
2002



Universidade Federal do Paraná  
Setor de Ciências Agrárias – Centro de Ciências Florestais e da Madeira  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**  
Av. Lothário Meissner, 3400 - Jardim Botânico – CAMPUS III  
80210-170 - CURITIBA - Paraná  
Tel. (41) 380.4212 - Fax. (41) 380.4211 - <http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao>  
e-mail: [pinheiro@floresta.ufpr.br](mailto:pinheiro@floresta.ufpr.br)

## PARECER

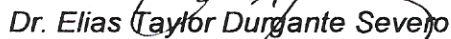
Defesa nº 460

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir o doutorando *RICARDO JORGE KLITZKE* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NA SECAGEM DE MADEIRA", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do acadêmico, habilitando-o ao título de *Doutor em Ciências Florestais*, na área de concentração em *Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais*.



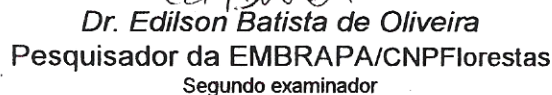
*Dr. Graziela Ines Bolzon de Muñiz*

Professora e pesquisadora do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR  
Orientadora e presidente da banca examinadora

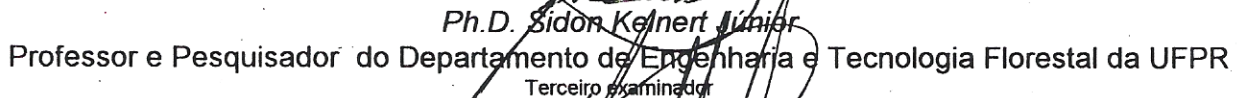


*Dr. Elias Taylor Durgante Severo*

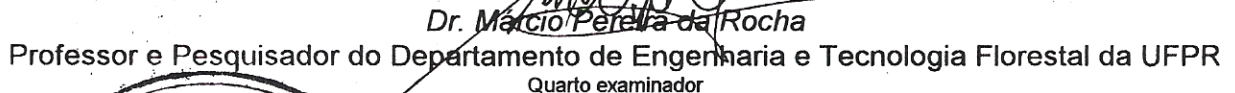
Professor e pesquisador da Universidade Estadual Paulista-Botucatu-SP.  
Primeiro examinador



*Dr. Edilson Batista de Oliveira*  
Pesquisador da EMBRAPA/CNPFFlorestas  
Segundo examinador



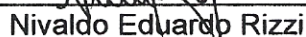
*Ph.D. Sidon Keinert Júnior*  
Professor e Pesquisador do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR  
Terceiro examinador



*Dr. Márcio Perella da Rocha*  
Professor e Pesquisador do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR  
Quarto examinador



Curitiba, 07 de fevereiro de 2002.



*Nivaldo Eduardo Rizzi*

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

*Franklin Galvão*  
Vice-coordenador

Agradeço aos meus pais,

Oswaldo Klitzke e Wally Maria Ristau Klitzke, os quais amo de todo coração.

Á minha amada e incansável esposa,

Marisa Terezinha Klitzke, que sempre esteve presente em todos os momentos, cuidando de tudo, me incentivando, me apoiando, entendendo a minha ausência diária, cuidando de minhas meninas,

Erika, Wally e Gabriela, as quais sou eternamente agradecido por tê-las recebido em minha vida.

Aos meus irmãos,

Leonor Klitzke (*in memoriam*);

Luis Carlos Klitzke (*in memoriam*);

Reinaldo Sérgio Klitzke;

Walfred Klitzke;

Waldereson Klitzke

*Em especial gostaria de agradecer e dedicar este estudo ao meu irmão “Walfred” pelo seu apoio, dedicando horas suas em prol deste estudo, pela sua capacidade e pelo seu potencial de trabalho.*

Á Deus por todos os momentos de minha vida. “Rendei graças ao senhor porque ele é bom”. (Salmo 136:1).

## AGRADECIMENTOS

A Prof<sup>a</sup> Dra. Graciela Inez Bolzón de Muñiz, pela orientação, pela amizade, pelo apoio constante, sempre me incentivando e pela confiança depositada em minha pessoa.

Ao Prof. Dr. Ivan Tomaselli, pela orientação, ao qual tenho grande consideração e admiração, pelos ensinamentos ao longo dos anos e principalmente neste estudo pelas orientações técnicas que nunca me faltaram e que me ajudaram de forma marcante a alcançar os objetivos aqui propostos.

Ao Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha, ao “amigo”, pela valiosa orientação, sempre incentivando, colaborando e acompanhando meus desafios e também pelas constantes cobranças diárias “Como é, já terminou”.

À Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de cursar Pós-Graduação e estar fazendo parte de um dos cursos mais renomados do país.

Ao Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná e em especial aos chefes que sempre me apoiaram e incentivaram meu crescimento profissional.

Ao Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, pelo completo apoio do início ao fim deste estudo.

À Battistella Indústria e Comércio Ltda., em especial ao Sr. Gilberto Battistella que acreditou na idéia, viabilizando este estudo, ao qual tenho grande consideração e apreço, pelas suas valiosas e oportunas sugestões, pela confiança depositada, o meu muito obrigado.

À Marrari Automação, pelo apoio técnico e material que sempre me foi dado. Em especial gostaria de agradecer Aos Senhores Celso Martini e Antônio Sérgio Beraldo pela amizade, pelo tempo dedicado ao estudo, pelo incentivo, e valiosas sugestões. Gostaria também de agradecer a toda equipe técnica senhores Paulo Cesar Martini, Ronaldo José do Carmo, Frank James Leon Bordes, Vidal Signorelli, Emerson Sasso, Marcelo Hernandez e a senhora Eluzay Maciel.

Ao Instituto Tecnológico do Laboratório Central de Pesquisas e Desenvolvimento (LACTEC - COPEL), pelo apoio referente ao medidor de energia elétrica em especial gostaria de agradecer ao Eng. José Carlos do Nascimento.

À StartUp Assessoria ao Eng. Marcílio T. F. Júnior, que por intermédio do Sr. Gilberto Battistella viabilizou o inversor de frequência o qual foi o objeto do estudo.

À Siemens do Brasil, em especial ao Eng. Jorge Waldo Baez que foi importante neste estudo com apoio e oportunas sugestões.

À Engetronic em especial ao Eng. Fábio Eduardo Scarabelot, pela amizade, apoio técnico de horas e ótimas sugestões.

Ao Centro Estações Experimentais do Cangüiri, da Universidade Federal do Paraná, pelo apoio nas etapas fundamentais do estudo. Agradeço em especial aos funcionários deste centro, As chefias que sempre tentaram ao máximo viabilizar rapidamente as necessidades, ao Lineu, aos funcionários da serraria Lourival Scharaiber, José Barbosa, Orlando Ruzenete e aos demais que apoiaram.

Ao secretário do Curso de Pós-Graduação, em Eng. Florestal da Universidade Federal do Paraná Sr. Reinaldo Mendes de Souza e a Sra. Elinor do Rocio L. Gorin por toda colaboração que deram durante os anos do curso.

Aos Professores do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, ao Prof. Sidon Keinert Júnior, pela amizade e incentivo, sempre me apoiando e pronto a colaborar, e aos demais professores; Prof. João Carlos Moreschi, Prof. Lincoln Lopes Teixeira, Prof. Setsuo Iwakiri, Prof. Martin Roeder, Prof. Eliseu Lacerda, Prof. Arnoud Bonduelle e Prof.<sup>a</sup> Ghislaine Miranda Bonduelle, Prof. Umberto Klock, Prof. Jorge L. M. de Matos e ao Prof. Dimas Agostinho da Silva, pelas sugestões, apoio e incentivo. Em especial agradeço ao saudoso Prof. Nadir Silva Castro com quem tive o prazer de trabalhar por muitos anos, o qual sempre me incentivou e ajudou a chegar onde estou hoje.

À Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira, da Universidade Federal do Paraná, na pessoa da senhora Tânia de Barros Baggio, pela sua simpatia e grande ajuda em todos os momentos, quanto a busca de referências e na apresentação das mesmas.

Aos colegas de Pós-Graduação, Fernando, Nabor, Márcio Torreão, Silvana, Lourival, Camargo, Martha, Rui, José de Castro, José Reinaldo, Leopoldo, Cláudio, João Vicente, Geraldo Bortoleto, Edvá de Brito, pela amizade e incentivo.

Aos amigos de trabalho de todos os dias aos quais devo grande parte deste estudo, que sempre me apoiaram nos momentos que necessitei sem nunca questionar. Em especial aos “amigos” Vitor Daniel Herrera e Ademir José Cavalli e ao grande Pedro Salvador Herrera e aos demais, Antônio Perin, Soli D’al Comuni, Gilnei Machado Rosa, Dionéia Calixto de Souza, a Nazidir da Silva e a Sra. Deoside Luqueta Cadore.

Aos estudantes que querem atuar na *Área de Tecnologia da Madeira*, em especial Alan Sulato, José G. Prata, Daniel Chies, Allan F. Clemente, Dayane G. Nogueira, Rosário, Rodriguez, Herbert, H. Niederhertmann, Gizele, Valdir, Márcia, Critiane, Ezequiel, Eduardo e Mariana e especialmente à Cilene que sempre esteve presente e aos demais que aqui não estão apresentados.

Aos amigos Prof. Nilton José Sousa, Prof. Romano Timoeiczkyk, Prof. Jorge Luiz Moretti de Souza, Prof. Alessandro Camargo Ângelo, Prof. Marcelo Diniz Vitorino, Prof. Carlos Roderjan, Prof. Rudi Seitz, entre outros pelo incentivo e apoio. Ao Eng. Carlos Augusto Puehringer, ao Eng. Marco Tuoto, aos amigos Manoel Américo Mendonça, Carlos Guarise pelo apoio, incentivo e amizade e pelas sugestões, o meu muito obrigado.

Gostaria de agradecer especialmente a um “amigo” Prof. Roberto Rochadelli, que não mediu esforços para que este estudo pudesse ser finalizado, esteve presente nos momentos mais difíceis, colaborando na análise estatística e econômica deste estudo, o meu muito obrigado Rocha.

# SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiv
LISTA DE ANEXOS.....	xv
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
2.1 DESCRIÇÃO DA MADEIRA.....	4
2.2 IMPORTÂNCIA DA MADEIRA DE PINUS.....	6
2.3 ASPECTOS FÍSICOS RELACIONADOS À SECAGEM.....	6
<b>2.3.1 Tipos de Água da Madeira.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3.2 Movimento da água na Madeira.....</b>	<b>8</b>
2.3.2.1 Capilaridade.....	8
2.3.2.2 Difusão.....	10
2.4 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA EM SECAGEM DE MADEIRA.....	13
2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DE SECAGEM.....	18
<b>2.5.1 Inerentes ao material.....</b>	<b>18</b>
2.5.1.1 Estrutura anatômica.....	18
2.5.1.2 Teor de umidade.....	18
2.5.1.3 Massa específica.....	24
2.5.1.4 Espessura da madeira.....	25
<b>2.5.2 Inerentes ao ambiente.....</b>	<b>26</b>

2.5.2.1	Temperatura.....	26
2.5.2.2	Umidade relativa.....	27
2.5.2.3	Velocidade do ar.....	28
2.6	TAXA DE SECAGEM.....	31
2.7	DEFEITOS CAUSADOS PELA SECAGEM.....	37
2.8	CONSUMO DE ENERGIA NA SECAGEM DE MADEIRA.....	42
2.8.1	Energia térmica.....	42
2.8.2	Energia elétrica.....	43
2.9	VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO AR EM FUNÇÃO DA VAZÃO MÍNIMA NECESSÁRIA.....	48
2.10	INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	55
2.11	INVERSOR DE FREQUÊNCIA NA SECAGEM DA MADEIRA.....	56
2.11.2	Inversor ou conversor de frequência.....	59
2.11.3	Vantagens e limitações do uso do inversor de frequência.....	61
2.11.4	Características operacionais do inversor de frequência.....	62
2.11	ANÁLISE ECONÔMICA DE PROJETOS.....	64
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	67
3.1	COLETA DO MATERIAL.....	67
3.2	PREPARAÇÃO DO MATERIAL PARA A SECAGEM.....	68
3.2.1	Teor de umidade inicial.....	68
3.2.2	Massa específica aparente verde.....	69
3.3	CÂMARA DE SECAGEM DE MADEIRA.....	70
3.4	SISTEMAS DE CONTROLE E ARMAZENAMENTO DOS DADOS.....	73
3.4.1	Gerenciamento do processo de secagem.....	73
3.4.2	Inversor de frequência e medidor de energia.....	74
3.4.3	Sistema de pesagem da carga (método gravimétrico).....	75

<b>3.4.4 Sistema elétrico por cabos sensores (método resistivo)</b> .....	76
<b>3.5 VARIÁVEIS CONTROLADAS NO PROCESSO</b> .....	77
<b>3.5.1 Programas de secagem</b> .....	77
<b>3.5.2 Velocidade de circulação do ar</b> .....	79
<b>3.5.3 Consumo de energia elétrica em função da rotação do motor</b> .....	81
<b>3.6 CÁLCULOS PARA USO INVERSOR DE FREQUÊNCIA</b> .....	81
<b>3.6.1 Vazão mínima de ar para cada fase da secagem</b> .....	81
<b>3.6.2 Vazão de ar (%) para cada fase da secagem</b> .....	83
<b>3.7. TAXA DE SECAGEM</b> .....	86
<b>3.8 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MADEIRA APÓS A SECAGEM</b> .....	86
<b>3.8.1 Massa específica aparente verde e seca</b> .....	87
<b>3.8.2 Teor de umidade final da madeira</b> .....	87
<b>3.8.3 Contração da madeira</b> .....	88
3.8.3.1 Contração em largura .....	88
3.8.3.2 Contração em espessura .....	88
<b>3.8.4 Efeito da secagem na coloração e da mancha marrom da madeira</b> .....	89
3.8.4.1 Coloração da madeira .....	89
3.8.4.2 Mancha marrom .....	89
<b>3.8.5 Distribuição da umidade e avaliação das tensões internas</b> .....	89
3.8.5.1 Gradiente de umidade .....	89
3.8.5.2 Tensões internas .....	90
<b>3.9 INVERSOR DE FREQUÊNCIA E SEUS IMPACTOS NA SECAGEM DA MADEIRA</b> .....	91
<b>3.9.1 Influência do inversor de frequência no consumo de energia elétrica</b> .....	91
<b>3.9.2 Modelo matemático para estimar a economia de energia elétrica</b> .....	92
<b>3.10 ANÁLISE DO INVESTIMENTO ADICIONAL</b> .....	92



3.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	94
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>96</b>
4.1 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE CIRCULAÇÃO DE AR E DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA CÂMARA DE SECAGEM .....	96
<b>4.1.1 Velocidade de circulação do ar na câmara de secagem.....</b>	<b>96</b>
<b>4.1.2 Vazão de ar na câmara.....</b>	<b>97</b>
<b>4.1.3 Consumo de energia elétrica com variação da rotação do motor na câmara.....</b>	<b>97</b>
4.2 EFEITO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM NO TEMPO.....	100
<b>4.2.1 Programas de secagem .....</b>	<b>100</b>
<b>4.2.2 Influência do uso do inversor de frequência .....</b>	<b>103</b>
<b>4.2.3 Influência da temperatura .....</b>	<b>105</b>
<b>4.2.4 Influência da velocidade do ar.....</b>	<b>105</b>
4.3 TAXA DE SECAGEM.....	106
<b>4.3.1 Influência do inversor de frequência .....</b>	<b>108</b>
<b>4.3.2 Influência da temperatura .....</b>	<b>110</b>
<b>4.3.3 Influência da velocidade do ar.....</b>	<b>113</b>
<b>4.3.4 Análise de regressão na taxa de secagem.....</b>	<b>114</b>
4.4 QUALIDADE DA MADEIRA APÓS A SECAGEM .....	116
<b>4.4.1 Massa específica da madeira .....</b>	<b>116</b>
4.4.1.1 Massa específica aparente verde.....	116
4.4.1.2 Massa específica aparente seca.....	117
<b>4.4.2 Teor de umidade da madeira.....</b>	<b>119</b>
4.4.2.1 Teor de umidade inicial .....	119
4.4.2.2 Teor de umidade final.....	122
<b>4.4.3 Análise de regressão no teor de umidade por pesagem.....</b>	<b>124</b>
<b>4.4.4 Efeito na contração.....</b>	<b>127</b>

4.4.4.1 Contração em largura.....	127
4.4.4.2 Contração em espessura.....	128
<b>4.4.5 Gradiente do teor de umidade (G.U.) .....</b>	<b>130</b>
<b>4.4.6 Tensões internas.....</b>	<b>132</b>
<b>4.4.7 Coloração superficial e mancha marrom na madeira .....</b>	<b>133</b>
<b>4.5 INVERSOR DE FREQUÊNCIA E SEUS IMPACTOS NA ENERGIA ELÉTRICA DURANTE A SECAGEM DA MADEIRA .....</b>	<b>136</b>
<b>4.5.1 Influência no consumo de energia elétrica .....</b>	<b>136</b>
<b>4.5.2 Modelo matemático para estimar o consumo de energia elétrica na secagem de madeira .....</b>	<b>144</b>
<b>4.6 ANÁLISE DO INVESTIMENTO ADICIONAL.....</b>	<b>146</b>
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>148</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>151</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>166</b>

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
TABELA 1. ECONOMIA DE ENERGIA EM CONTROLE AUTOMÁTICO DA VELOCIDADE DO AR NA SECAGEM DA MADEIRA. ....	46
TABELA 2. PROPRIEDADES TÉRMICAS DO VAPOR DE ÁGUA, ADAPTADO DE PERRY (1950).....	53
TABELA 3. ECONOMIA DE ENERGIA ESTIMADA COM A REDUÇÃO DA VELOCIDADE DO AR.....	57
TABELA 4. PROGRAMA DE SECAGEM PARA TEMPERATURA DE 70 <sup>o</sup> C .....	78
TABELA 5. PROGRAMA DE SECAGEM PARA TEMPERATURA DE 90 <sup>o</sup> C .....	79
TABELA 6. VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA O CÁLCULO DA VAZÃO MÍNIMA NAS DIFERENTES FASES DA SECAGEM DE <i>Pinus taeda</i> COM 36mm DE ESPESSURA NA TEMPERATURA DE 90 <sup>o</sup> C .....	82
TABELA 7. VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA O CÁLCULO DA VAZÃO MÍNIMA NAS DIFERENTES FASES DA SECAGEM DE <i>P. taeda</i> COM 36mm DE ESPESSURA NA TEMPERATURA DE 70 <sup>o</sup> C .....	82
TABELA 8. VAZÃO DE AR (m <sup>3</sup> /h) CALCULADA PARA CADA FASE DAS CUVAS DE SECAGEM ESTUDADAS .....	83
TABELA 9. VELOCIDADE DO AR (%) APLICADA NO MOTOR EM CADA FASE DOS PROGRAMAS DE SECAGEM.....	85
TABELA 10. TAXA DE SECAGEM CALCULADA EM DIFERENTES FAIXAS DE UMIDADE.....	86
TABELA 11. CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA.....	93
TABELA 12. CARACTERÍSTICAS DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	93
TABELA 13. FATORES E NÍVEIS ADOTADOS NA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS .....	94
TABELA 14. VARIÁVEIS UTILIZADAS NA ANÁLISE DE REGRESSÃO.....	95
TABELA 15. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS OBTIDOS DAS VELOCIDADES DO AR DE 2 E 4m/s, ADOTADAS NOS PROGRAMAS DE SECAGEM.....	96
TABELA 16. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS OBTIDOS DAS VAZÕES DO AR PARA 2 E 4m/s, ADOTADAS NOS PROGRAMAS DE SECAGEM .....	97
TABELA 17. CONSUMO RELATIVO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR DO VENTILADOR NA CÂMARA DE SECAGEM.....	98
TABELA 18. TAXA DE SECAGEM (%U/h) E (kgU/h) PARA DIFERENTES FAIXAS DE TEORES DE UMIDADE PARA TODOS OS PROGRAMAS ESTUDADOS .....	107
TABELA 19. CORELAÇÕES ENCONTRADAS ENTRE A TAXA DE SECAGEM E O TEMPO E ENTRE O TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM NOS PROGRAMAS .....	114

TABELA 20. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE VERDE (MEAV), DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .....	117
TABELA 21. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE VERDE (MEAV), DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .....	118
TABELA 22. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DO TEOR DE UMIDADE INICIAL, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .....	120
TABELA 23. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DO TEOR DE UMIDADE FINAL, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .....	122
TABELA 24. CORELAÇÕES ENCONTRADAS ENTRE A TAXA DE SECAGEM E O TEMPO E ENTRE O TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM NOS PROGRAMAS .....	124
TABELA 25. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DA CONTRAÇÃO EM LARGURA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .....	127
TABELA 26. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DA CONTRAÇÃO EM ESPESSURA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .....	129
TABELA 27. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DA GRADIENTE DE UMIDADE, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .....	131
TABELA 28. CONSUMO DE ENERGIA(kWh), TEMPO (h) E CONSUMO DE ENERGIA POR HORA (kWh/h) EM CADA FAIXA DE UMIDADE PARA CADA PROGRAMA.....	138
TABELA 29. CONSUMO TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA (kWh) E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA POR HORA (kWh/h) NOS PROGRAMAS .....	142
TABELA 30. MÉTODOS DE ANÁLISES DE VIABILIDADE ECONOMICA DO PROJETO .....	147

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. ESQUEMA SIMPLIFICADO DO MOVIMENTO DE ÁGUA EM UM CAPILAR (ADAPTADO DE KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).....	09
FIGURA 2. DISTRIBUIÇÃO ESQUEMÁTICA DO TEOR DE UMIDADE (%) AO LONGO DO FUSTE E A DIFERENTES POSIÇÕES PARA <i>P. elliotii</i> e <i>P. taeda</i> .....	20
FIGURA 3. DISTRIBUIÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE DURANTE A SECAGEM EM CÂMARA PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO E ELÉTRICO, COM PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADO.....	21
FIGURA 4. LOGARITMO DA RESISTIVIDADE CORRENTE CONTÍNUA ( $\log r$ ) EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE ACIMA E ABAIXO DO PSF (ADAPTADO DE SKAAR, 1972).....	23
FIGURA 5. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR NA TAXA DE SECAGEM (ADAPTADO DE SIMPSON, 1997).....	36
FIGURA 6. RELAÇÃO ENTRE A REDUÇÃO DA VELOCIDADE DO AR E A REDUÇÃO DE ENERGIA NOS VENTILADORES. ADAPTADO DE SIMPSON (1997).....	45
FIGURA 7. DEMANDA DE ENERGIA DOS VENTILADORES PARA DOIS EXEMPLOS DE CÂMARA DE SECAGEM (A PARA FOLHOSAS E B PARA CONÍFERAS) COM E SEM A REGULAÇÃO DA ROTAÇÃO POR MINUTO DOS MOTORES (JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA, 1989).....	48
FIGURA 8. CURVA DE ENERGIA CONSUMIDA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO FLUXO DE AR. OBTIDA DO <i>Software Mastersave</i> (SIEMENS, 1998).....	60
FIGURA 9. CARACTERÍSTICAS DE CARGAS TÍPICAS.....	63
FIGURA 10. RETIRADA DAS AMOSTRAS DAS TÁBUAS E FORMAÇÃO DAS CARGAS DO PRIMEIRO LOTE DE (4m/s).....	68
FIGURA 11. FORMAÇÃO DA CARGA NO CARRO TRANSPORTADOR.....	70
FIGURA 12. CÂMARA DE SECAGEM UTILIZADA NO ESTUDO.....	71
FIGURA 13. TERMOPARES UTILIZADOS PARA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR NA ENTRADA E NA SAÍDA DA PILHA.....	74
FIGURA 14. INVERSOR DE FREQUÊNCIA E MEDIDOR DE ENERGIA UTILIZADO.....	75
FIGURA 15. SISTEMA DE PESAGEM DA CARGA UTILIZADO PARA OBTENÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA DESENVOLVIDO POR SANTINI (1996).....	76
FIGURA 16. CABOS SENSORES DISTRIBUÍDOS NA CARGA DE MADEIRA.....	77
FIGURA 17. VISTA FRONTAL DA CÂMARA DE SECAGEM MOSTRANDO OS PONTOS DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR.....	80
FIGURA 18. APLICAÇÃO DA VELOCIDADE (%) EM FORMA DE RAMPA NAS DIFERENTES FASES DAS CURVAS DE SECAGEM.....	85
FIGURA 19. RETIRADA DAS AMOSTRAS PARA MEDIÇÃO DA UMIDADE, GRADIENTE DE UMIDADE E TENSÕES INTERNAS.....	88

FIGURA 20. METODOLOGIA DE CORTE PARA MEDIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DO CENTRO E DA SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS ANALISADAS ADAPATADA DE SIMPSON (1991).....	90
FIGURA 21. TESTE DE GARFO UTILIZADO PARA AVALIAR AS TENSÕES INTERNAS.....	91
FIGURA 22. CONSUMO DE ENERGIA RELATIVA EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO RELATIVA FORNECIDA AO MOTOR DO VENTILADOR DA CÂMARA DE SECAGEM.....	99
FIGURA 23. CURVA GENÉRICA DE SECAGEM DE MADEIRA PARA A TEMPERATURA DE 70°C .....	101
FIGURA 24. CURVA GENÉRICA DE SECAGEM DE MADEIRA PARA A TEMPERATURA DE 90°C .....	101
FIGURA 25. CURVAS DE SECAGEM PARA 4m/s COM E SEM UTILIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NAS TEMPERATURAS DE 70 E 90°C .....	103
FIGURA 26. CURVAS DE SECAGEM PARA 2m/s COM E SEM UTILIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NAS TEMPERATURAS DE 70 E 90°C .....	103
FIGURA 27. TEMPO DE SECAGEM PARA OS DIFERENTES PROGRAMAS.....	104
FIGURA 28. TAXA DE SECAGEM (kgU/h) PARA DIFERENTES FAIXAS DE TEORES DE UMIDADE PARA TODOS OS PROGRAMAS ESTUDADOS .....	108
FIGURA 29. INFLUÊNCIA DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NA TAXA DE SECAGEM NAS TEMPERATURAS DE 70 E 90°C E NAS VELOCIDADE DO AR DE 2 E 4m/s .....	109
FIGURA 30. TAXAS DE SECAGEM PARA AS CURVAS DE 70°C VELOCIDADES DE 2 E 4m/s .....	111
FIGURA 31. TAXAS DE SECAGEM PARA AS CURVAS DE 90°C NAS VELOCIDADES DE 2 E 4m/s.....	111
FIGURA 32. REGRESSÃO LINEAR LOGARÍTMICA DECRESCENTE AJUSTADA PARA ESTIMAR A TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM.....	115
FIGURA 33. REGRESSÃO LINEAR DE SEGUNDA ORDEM AJUSTADA PARA ESTIMAR A TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM .....	116
FIGURA 34. MASSA ESPECÍFICA APARENTE MÉDIA VERDE E SECA PARA AS CURVAS DE <i>P. taeda</i> .....	119
FIGURA 35. DISTRIBUIÇÃO DO TEOR MÉDIO DE UMIDADE INICIAL OBTIDO ENTRE OS PROGRAMAS ESTUDADOS.....	120
FIGURA 36. DISTRIBUIÇÃO DO TEOR UMIDADE FINAL ENCONTRADA ENTRE OS PROGRAMAS ESTUDADOS.....	123
FIGURA 37. REGRESSÃO POLINOMIAL DECRESCENTE AJUSTADAS PARA ESTIMAR O TEOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM.....	125
FIGURA 38. REGRESSÃO LINEAR DECRESCENTE AJUSTADA PARA ESTIMAR O TEOR DE UMIDADE FUNÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA .....	126
FIGURA 39. CONTRAÇÃO MÉDIA EM LARGURA OBTIDA PARA OS PROGRAMAS ESTUDADOS.....	128

FIGURA 40. CONTRAÇÃO MÉDIA EM ESPESSURA OBTIDA PARA OS PROGRAMAS ESTUDADOS .....	130
FIGURA 41. GRADIENTE MÉDIO DE UMIDADE OBTIDA PARA OS PROGRAMAS ESTUDADOS .....	132
FIGURA 42. AVALIAÇÃO DAS TENSÕES INTENAS ENTRE AS CURVAS ESTUDADAS (TESTE DO GARFO) .....	133
FIGURA 43. AVALIAÇÃO DA COLORAÇÃO SUPERFICIAL DAS PEÇAS UTILIZADAS NOS PROGRAMAS (90 4C E 70 2V) .....	134
FIGURA 44. AVALIAÇÃO DA MANCHA MARROM NAS CURVAS ESTUDADAS .....	136
FIGURA 45. CURVAS DE ENERGIA CONSUMIDA PARA VELOCIDADE DO AR DE 2m/s NAS TEMPERATURAS DE 90 E 70°C COM E SEM O USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA .....	137
FIGURA 46. CURVAS DE ENERGIA CONSUMIDA PARA VELOCIDADE DO AR DE 4m/s NAS TEMPERATURA DE 90 E 70°C COM E SEM O USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA .....	137
FIGURA 47. INCREMENTO NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA (kWh) PARA OS PROGRAMAS COM TEMPERATURA DE 70°C COM VELOCIDADE DO AR DE 2m/s CONSTANTE E VARÁVEL, NAS DIFRENTES FAIXAS DE UMIDADE .....	140
FIGURA 48. INCREMENTO NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA (kWh) PARA OS PROGRAMAS COM TEMPERATURA DE 90°C COM VELOCIDADE DO AR DE 4m/s CONSTANTE E VARÁVEL, NAS DIFRENTES FAIXAS DE UMIDADE.....	141
FIGURA 49. CONSUMO TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA (kWh) NOS PROGRAMAS.....	142
FIGURA 50. CURVAS DE REGRESSÃO REPRESENTANDO AS RELAÇÕES DO CONSUMO DE ENERGIA COM VELOCIDADE CONSTANTE E VARIÁVEL EM FUNÇÃO DO TEMPO (h).....	145
FIGURA 51. CURVA DA DIFERENÇA MATEMÁTICA REPRESENTANDO A ECONOMIA DE ENERGIA (kWh) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM (h). .....	146

## LISTA DE ABREVIATURAS

PSF – Ponto de saturação das fibras.

$\Delta T$  – Queda de temperatura do ar na passagem pela pilha de madeira.

TBS – Temperatura (C°) do termômetro de bulbo seco.

TBU – temperatura (C°) do termômetro de bulbo úmido.

90 4C – 90°C de temperatura com 4m/s de velocidade do ar, constante;

90 4V – 90°C de temperatura com 4m/s de velocidade do ar, variável;

90 2C – 90°C de temperatura com 2m/s de velocidade do ar, constante;

90 2V – 90°C de temperatura com 2m/s de velocidade do ar, variável;

70 4C – 70°C de temperatura com 4m/s de velocidade do ar, constante;

70 4V – 70°C de temperatura com 4m/s de velocidade do ar, variável;

70 2C – 70°C de temperatura com 2m/s de velocidade do ar, constante;

70 2V – 70°C de temperatura com 2m/s de velocidade do ar, variável.



## LISTA DE ANEXOS

pág.

ANEXO 1. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO (ANOVA) PARA MASSA ESPECÍFICA APARENTE VERDE (MEAPV).....	168
ANEXO 2. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO (ANOVA) PARA O TEOR DE UMIDADE NICIAL (TUI).....	169
ANEXO 3. TESTE DE COMPARAÇÃO MÉDIAS (TUKEY).....	169
ANEXO 4. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA (MEAPS).....	170
ANEXO 5. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA O TEOR DE UMIDADE FINAL POR PESAGEM (TUFPP).....	171
ANEXO 6. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA O FATORES – VELOCIDADE, TEMPERATURA, INVERSOR E VELOCIDADE DO AR / INVERSOR DE FREQUÊNCIA (TUFPP).....	172
ANEXO 7. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA O TEOR DE UMIDADE FINAL ELÉTRICO (TUFE) .....	173
ANEXO 8. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA O FATORES – VELOCIDADE, TEMPERATURA, INVERSOR E VELOCIDADE DO AR / INVERSOR DE FREQUÊNCIA E VELOCIDADE DO AR / TEMPERATURA / INVERSOR DE FREQUÊNCIA (TUFE) .....	174
ANEXO 9. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA A MEDIÇÃO DA CONTRAÇÃO EM LARGURA (MCL).....	176
ANEXO 10. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA O FATORES – VELOCIDADE, TEMPERATURA, INVERSOR E VELOCIDADE DO AR / INVERSOR DE FREQUÊNCIA E VELOCIDADE DO AR / TEMPERATURA / INVERSOR DE FREQUÊNCIA (MCL).....	177
ANEXO 11. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA A MEDIÇÃO DA ESPESSURA (ME) .....	178
ANEXO 12. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA O FATOR TEMPERATURA (ME).....	179
ANEXO 13. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA A MEDIÇÃO DA CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA (MCV) .....	180
ANEXO 14. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA O FATOR VELOCIDADE DO AR E TEMPERATURA (MCV).....	181

ANEXO 15. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA A DETERMINAÇÃO DO GRADIENTE DE UMIDADE (GU) .....	182
ANEXO 16. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA OS FATORES VELOCIDADE DO AR / TEMPERATURA E DA TEMPERATURA / INVERSOR DE FREQUÊNCIA (GU) .....	183
ANEXO 17. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 70°C COM 2m/s E SEM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE.....	184
ANEXO 18. ANALISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	185
ANEXO 19. ANALISE DE REGRESSÃO DO TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	186
ANEXO 20. ANALISE DE REGRESSÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	187
ANEXO 21. ANALISE DE REGRESSÃO DO CONSUMO DE ENERGIA COM USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM FUNÇÃO DO TEMPO .....	188
ANEXO 22. ANALISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM .....	190
ANEXO 23. ANALISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM EM FUNÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA .....	191
ANEXO 24. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 70°C COM 2m/s E COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE .....	192
ANEXO 25. ANALISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	193
ANEXO 26. ANALISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	194
ANEXO 27. ANALISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/h) EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM (%).....	195
ANEXO 28. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 70°C COM 4m/s E SEM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE.....	196
ANEXO 29. ANALISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	197
ANEXO 30. ANALISE DE REGRESSÃO DO TEOR DA TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	198
ANEXO 31. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 70°C COM 4m/s E COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE .....	199
ANEXO 32. ANALISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	200
ANEXO 33. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%) E O CONSUMO DE ENERGIA (Wh) .....	201
ANEXO 34. ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE A TAXA DE SECAGEM (U%/h) E O TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%) .....	202

ANEXO 35. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 90°C COM 4m/s E COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE .....	203
ANEXO 36. ANALISE DE REGRESSÃO DA TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM (%) EM FUNÇÃO DO TEMPO (h).....	204
ANEXO 37. ANALISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/h) EM FUNÇÃO DO TEMPO (h) .....	205
ANEXO 38. ANALISE DE REGRESSÃO DO CONSUMO DE ENERGIA SEM USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM FUNÇÃO DO TEMPO .....	206
ANEXO 39. ANALISE DE REGRESSÃO DO CONSUMO DE ENERGIA COM USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM FUNÇÃO DO TEMPO .....	207
ANEXO 40. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 90°C COM 4m/s E SEM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE .....	209
ANEXO 41. ANALISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/h) EM FUNÇÃO DO TEMPO (h) .....	210
ANEXO 42. ANALISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%) EM FUNÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA (kWh).....	211
ANEXO 43. ANALISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/h) EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%).....	212
ANEXO 44. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 90°C COM 2m/s E SEM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE .....	213
ANEXO 45. ANALISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%) EM FUNÇÃO DO TEMPO (h).....	214
ANEXO 46. ANALISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/h) EM FUNÇÃO DO TEMPO (h) .....	215
ANEXO 47. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 90°C COM 2m/s E COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE .....	216
ANEXO 48. ANALISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/H) EM FUNÇÃO DO TEMPO (h) .....	217
ANEXO 49. ANALISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%) EM FUNÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA (Wh) .....	218
ANEXO 50. ANALISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/H) EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%).....	219

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo tornar a indústria madeireira mais competitiva no mercado, gerando informações sobre o uso do inversor de frequência em secadores de madeira serrada. Foi estudada a influência do inversor de frequência na taxa de secagem da madeira e na sua qualidade, no consumo de energia elétrica durante o processo e suas implicações nos custos de secagem. Desenvolveu-se um modelo matemático para estimar a economia gerada pelo inversor durante a secagem. No experimento foi utilizado madeira de *Pinus taeda*, com 36mm de espessura, avaliada sob duas temperaturas (70 e 90°C) e duas velocidades do ar (2 e 4m/s), sendo com velocidades do ar constante e variável, formando oito condições de secagem diferentes. O experimento foi conduzido em câmara semindustrial com controle automatizado para coleta e armazenamento dos dados. O teor de umidade da madeira foi obtido durante a secagem por pesagem da carga e pelo método elétrico. O sistema de gerenciamento automatizado “*hardware*” e “*software*” utilizado no processo de secagem foi comercial, sendo adaptado a ele, o inversor de frequência e um medidor de energia elétrica, ambos ligados ao motor do ventilador da câmara. Analisou-se inicialmente as condições da câmara quanto a vazão de ar e o consumo de energia elétrica. A avaliação da câmara de secagem foi eficiente. A taxa de secagem foi influenciada pelo uso do inversor de frequência, mas não de forma acentuada. Os modelos matemáticos para estimar a taxa de secagem em função do tempo e do teor de umidade por pesagem apresentaram-se altamente significativos. Os parâmetros de qualidade da madeira, mantiveram-se normais com o uso do inversor de frequência. O inversor de frequência reduziu fortemente o consumo de energia elétrica durante a secagem da madeira, apresentando economia média de 32%. O modelo matemático desenvolvido apresentou boa estimativa da economia de energia elétrica gerada pelo uso do inversor de frequência. O estudo de viabilidade econômica do investimento adicional (inversor de frequência), na secagem de madeira mostrou-se altamente viável atingindo uma Taxa Interna de Retorno de 36,5%.

## ABSTRACT

This work had as objective to become the lumber industry more competitive in the market, generating information on the use of the frequency inverter in sawed wood dryers. The frequency inverter influence in the wood drying rate and in its quality, the electric energy consumption during the process and its implications in the drying costs were studied. A mathematical model was developed to estimate the economy generated by the inverter during the drying process. *Pinus taeda* wood was used in the experiment, lumber with 36mm of thickness was evaluated under two temperature conditions (70 and 90°C) and two air speeds (2 and 4m/s), with constant and variable air speeds, thus giving eight different drying conditions. The experiment was lead in semi industrial chamber with automatized control for data collection and storage. The wood moisture content was taken during the drying process by the load weighting and by electric method. The automatized management system (hardware and software) used in the drying process was commercial, being the frequency inverter and the electric energy measurer adapted to the chamber fan engine. Initially the chamber conditions, as the air outflow and the consumption of electric energy were analyzed. The results obtained showed satisfactory drying chamber conditions. The drying rate was slightly influenced by the use of the frequency inverter. The mathematical models to estimate the drying rate in function of the time and the wood moisture content showed to be highly significant. The wood quality parameters remained constant with the use of the frequency inverter. The frequency inverter strongly reduced the electric energy consumption during the wood drying process, presenting average energy saving of 32%. The developed mathematical model for the electric energy saving generated by the use of the frequency inverter showed good estimation. The study of economic feasibility for additional investment (inverting of frequency), in the wooden drying process revealed to be highly viable, reaching an Internal Tax of Rollback of 36.5%.

## 1. INTRODUÇÃO

A secagem da madeira visa assegurar que a mesma esteja dimensionalmente tão estável quanto possível, antes do seu reprocessamento ou usinagem. O emprego da madeira com teores de umidade compatíveis com as condições ambientais de uso, obtidos através de adequados procedimentos de secagem, reduzem as indesejáveis variações dimensionais (MILLS, 1991).

A influência da água na madeira impõe significativas limitações sobre a maioria de suas propriedades, comprometendo o bom desempenho na maioria dos seus usos. É uma etapa fundamental em praticamente todas as operações de transformação da madeira que visam à obtenção de um produto de qualidade; torna-se, pois, imprescindível nos processos que envolvem um alto índice de industrialização, como, por exemplo na fabricação de móveis, assoalhos, molduras, usinagem em geral, etc.

Vários métodos podem ser empregados na secagem de madeira. A alternativa mais apropriada, entretanto, precisa considerar o tipo de material a ser seco, a disponibilidade de equipamentos e os custos da secagem. Os critérios de escolha consideram a economia do método e a eficiência do processo como os fatores decisivos. Nesse sentido, a fonte de energia, bem como, a quantidade requerida nas diferentes fases da secagem assumem um papel preponderante no processo.

A incorporação de novas tecnologias em secagem da madeira foi facilitada pela abertura da economia na década de 90 e por aspectos intrínsecos à macroeconomia brasileira, permitindo a introdução de equipamentos importados. A tecnologia mais importante incorporada estava relacionada basicamente aos controladores da secagem. Os controladores nacionais eram até então, semi-automáticos e caros. Acessórios como inversores de frequência apresentavam preços extremamente elevados o que inviabilizava sua aplicação nos equipamentos para secagem de madeira.

O inversor de frequência é um equipamento versátil e dinâmico e dos mais utilizados em processos automatizados, conjuntamente com o Comando Lógico Processado (CLP). É quase impossível achar um segmento industrial onde seja desnecessária a presença de

acionamentos estáticos para motores elétricos, ou seja, os inversores de frequência. É um mercado em plena expansão no Brasil, cujo preço dos inversores hoje caiu tornando-se acessível para vários segmentos da indústria. Os grandes usuários são as indústrias que necessitam de uma velocidade variável em seus processos, destacando-se nessa parte aquelas situadas no segmento siderúrgico, petroquímico e papel e celulose (YAKSIC, 2001).

Quando decresce a oferta e o preço da energia aumenta, a economia de energia torna-se uma das variáveis mais importante no processo (CORDER, 1980). COMSTOCK (1975), estimou que na secagem o consumo de energia é 60 a 70% de toda energia gasta na produção da madeira manufaturada. Assim, uma pequena economia de energia na secagem da madeira significa grandes economias no uso total da energia. Segundo WENGERT & DENIG (1995), os custos da energia na secagem da madeira freqüentemente ficam ao redor de 50% dos custos de operação.

Estudos demonstram que uma variação da velocidade do ar permite uma economia considerável de energia, sem aumentar o tempo de secagem. A instalação de equipamentos que possam controlar a velocidade do fluxo de ar (inversores de frequência) durante a secagem pode gerar economia de 30 até 50% da energia elétrica consumida durante a secagem. Segundo SIMPSON (1997), CULPEPPER (1990) e GARRAHAN et al (1993), o uso de velocidade variável durante a secagem pode apresentar uma redução líquida no consumo de energia e nos custos de ventilação. O uso de inversores de frequência esta se tornando cada vez mais necessário na indústria principalmente por reduzir os custos de energia. De acordo com a ELETROBRAS (2001), os motores respondem por cerca de 50% do consumo de energia elétrica das indústrias e por 25% da eletricidade gasta no Brasil.

O Brasil está enfrentando uma crise de energia. Isso significa que não há energia elétrica suficiente e que toda energia disponível deve ser usada de maneira racional. Esta crise representa uma etapa difícil na história do País. Sem dúvida, ela exigirá atitudes especiais e um esforço de adaptação a esta nova realidade. Trata-se de uma crise grave, mas superável. A crise de energia tem quatro causas importantes, redução de investimentos, aumento da demanda, dependência de usinas hidrelétricas e de linhas de transmissão e o clima (CEMIG, 2001).

Durante a primeira metade da década de 90, os investimentos no setor elétrico

caracterizaram-se pela queda no ritmo de crescimento numa média de 4,95% ao ano. Contudo, com o início do processo de privatização, essa tendência se reverteu. Em 1999 a recuperação foi interrompida pela desvalorização do real (ELETROBRAS, 1998).

Dentro deste contexto este estudo teve como objetivo geral colaborar para o aumento da eficiência da indústria madeireira brasileira tornando-a mais competitiva no mercado através do desenvolvimento de técnicas buscando reduzir o consumo de energia elétrica na secagem da madeira.

Para atender este objetivo geral os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos.

- Desenvolvimento de um sistema para avaliação da câmara de secagem com relação ao sistema de circulação de ar e consumo de energia elétrica utilizando o inversor de frequência;
- Gerar e disponibilizar informações sobre o uso de inversores de frequência em secadores de madeira serrada no que se refere ao:
  - a) Efeito sobre a taxa de secagem;
  - b) Impactos do uso no consumo de energia elétrica e implicações nos custos de secagem;
  - c) influência na qualidade da madeira.
- Desenvolvimento de modelo matemático que permita estimar a economia de energia proporcionada pelo uso do inversor de frequência na secagem da madeira.
- Analisar o investimento adicional referente ao uso do inversor de frequência no processo de secagem da madeira;



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 DESCRIÇÃO DA MADEIRA

O *Pinus taeda* é uma conífera pertencente à família *Pinaceae*, comumente denominadas de pinus do sul, que crescem principalmente no sudeste dos Estados Unidos. As principais espécies são: *Pinus taeda*, *P. echinata*, *P. palustris* e *P. elliottii*, (KOCH, 1972).

Segundo GOGGANS (1964), a madeira de *Pinus taeda* apresenta uma massa específica aparente média de  $0,47\text{g/cm}^3$ , encontrando para o lenho primaveril  $0,29\text{g/cm}^3$  e  $0,63\text{g/cm}^3$  para o lenho outonal. Para MUÑIZ (1993), a massa específica aparente de *Pinus taeda* aumenta com a idade da madeira, até que se torne adulta, a partir dali permanece praticamente constante. Em seu estudo encontrou um valor médio para massa específica de  $0,516\text{g/cm}^3$ .

A massa específica é inversamente proporcional ao diâmetro do lúme tanto da madeira juvenil como adulta, sendo influenciada pelo comprimento e diâmetro das células, da espessura da parede celular, porção de lenho tardio e inicial, porcentagem de celulose, lignina, extrativos e traços de minerais (KOCH 1972). Segundo MUÑIZ (1993), a madeira juvenil ao redor da medula durante os primeiros 5 a 20 anos de crescimento da árvore, contraem mais que a madeira adulta causando empenamentos. Devido à anisotropia da madeira a permeabilidade é diferente no sentido longitudinal, radial e tangencial. A permeabilidade radial e tangencial do alburno para os *Pinus* spp é maior que na maioria das outras espécies (ERICKSON 1937). A porção de cerne com relação ao volume de madeira comercial de *Pinus taeda* varia diretamente com a idade e inversamente com a rapidez de crescimento. A formação de cerne começa aproximadamente aos 14 anos, mas aos 20 anos são somente encontradas quantidades insignificantes (MACKINEY & CHAIKEN, 1935).

Segundo MUÑIZ (1993), a madeira de *Pinus taeda* apresenta as seguintes características anatômicas. Os anéis de crescimento são distintos, com transição de lenho inicial para lenho tardio brusca. Alguns anéis estreitos alternando com anéis mais largos. Os traqueóides axiais no lenho inicial são de paredes finas e no lenho tardio são de parede mais espessa com parede radial menor. Suas dimensões variam de 960 à  $6676\mu\text{m}$  de comprimento,

32,5 à 72,5 $\mu\text{m}$  de diâmetro externo e de 15 à 60,03 $\mu\text{m}$  de diâmetro do lúme.

Os traqueóides longitudinais representam mais de 90% do volume da madeira dos pinus KOLLMANN E CÔTÈ (1968). O traqueóide contrai menos no sentido longitudinal durante a secagem (KOCH 1972). MCMILLIN (1969), determinou que as características da madeira juvenil são traqueóides mais curtos, paredes celulares mais delgadas, maior ângulo fibrilar e menor massa específica que na madeira adulta. Um menor ângulo fibrilar está relacionado com traqueóides mais compridos e madeiras mais densas devido a parede celular mais grossa. Muitas das diferenças de comprimento dos traqueóides estão associadas a diferenças entre a madeira juvenil e a madeira adulta. A madeira juvenil de *Pinus taeda* se estende até aproximadamente o décimo anel de crescimento (ZOBEL, 1961).

As pontoações areoladas do lenho inicial de até 30,5 $\mu\text{m}$  de diâmetro e com aberturas arredondadas de 6,5 $\mu\text{m}$  de diâmetro, em fileiras principalmente unisseriadas, apresentando às vezes de forma opostas ou alternas. As pontoações do lenho tardio mais escassas, com diâmetro de até 15,3 $\mu\text{m}$  e abertura de 2,5 à 8 $\mu\text{m}$ , com forma lenticular, de 5,5 $\mu\text{m}$  de diâmetro (HARADA, 1964).

A aspiração das pontoações ocorrem durante a penetração de ar dentro da câmara da pontoação causada pelas forças de adesão entre a membrana da pontoação e a capilaridade do líquido (PHILLIPS 1933). Investigações em várias coníferas tem mostrado que na secagem da madeira as pontoações em lenho inicial dos traqueóides são aspiradas. Mas com o acréscimo das espessuras da parede muitas pontoações aparecem desaspiradas, PHILIPS 1933, LIESE 1965, HARRIS 1954, BELLMANN 1955, KISHIMA & HAYASHI 1962. A razão para este comportamento é atribuída por uma diferença na estrutura na membrana da pontoação no lenho primaveril e lenho outonal. Contudo a relação ainda não tenha sido investigada em detalhes (BAILEY 1957).

HART & THOMAS (1967), estudaram as forças ar/menisco. Associado com o menisco entre o torus e as bordas da pontoação. As forças crescem com a redução de líquido quando o torus é aspirado na borda da pontoação. Aspiração de pontoação depende primordialmente da tensão superficial do líquido e do tamanho e da forma da abertura da pontoação e da parede do torus e do margo.

## 2.2 IMPORTÂNCIA DA MADEIRA DE PINUS

A secagem de madeira de *Pinus* sp no Brasil é recente. Surgiu no início da década de 80, juntamente com o desenvolvimento de indústrias de produtos de madeira sólida de pinus, particularmente a indústria de móveis e produtos de maior valor agregado (blocks, blanks, molduras, portas e outros) instalada na região sul do país. Tal processo de desenvolvimento foi alavancado basicamente pela maturação dos reflorestamentos de pinus implantados durante a vigência dos incentivos fiscais nos anos 60 e 70 aliada ao fenômeno da globalização quando alguns produtores nacionais identificaram oportunidades de negócios vislumbrando o mercado internacional.

Em 1980, estima-se que no Brasil não havia mais de 150 estufas de secagem de madeira de *Pinus* pp. Atualmente, acredita-se que o parque industrial orientado à sua secagem conte com mais de 3.000 estufas instaladas.

A rápida adoção da madeira de pinus como matéria-prima pela indústria de produtos de madeira sólida exigiu uma ampla adequação no processo para incorporação de novas tecnologias, tanto em termos de dimensionamento de equipamentos de secagem (câmaras) como em relação ao processo operacional, pois até então a experiência brasileira na secagem artificial estava baseada em algumas folhosas, a exemplo a imbuia, e notadamente no pinho.

## 2.3 ASPECTOS FÍSICOS RELACIONADOS A SECAGEM

### 2.3.1 Tipos de Água da Madeira

A secagem da madeira pode ser definida como um balanço dinâmico entre a transferência de calor do fluxo de ar para a madeira, superfície de evaporação da madeira, difusão da umidade através da madeira e a vazão de massa da água livre (HART, 1966).

Segundo PONCE E WATAI (1985), o teor de umidade pode variar muito, desde 30 até 200% em relação ao seu peso seco. após a derrubada da árvore, a madeira começa a perder umidade “seiva”, para o meio ambiente.

Segundo KOLLMANN (1959), a água existente na madeira pode ser classificada de duas maneiras:

- Água livre ou capilar, localizada nos luméns celulares e espaços intercelulares, retidas por forças capilares.
- Água de impregnação ou higroscópica, que se encontra nas camadas polimoleculares nos espaços submicroscópicos da parede celular, ligada por forças elétricas conhecidas como pontes de hidrogênio.

A água livre ou capilar é aquela umidade retida por forças capilares localizada nas cavidades das células e espaços intercelulares, incluindo vasos e canais resiníferos. Apesar de chamada de água livre, este tipo de água se localiza aderida aos tecidos da madeira, necessitando-se de considerável força para sua eliminação. Logo que a árvore é derrubada, a madeira perde toda a água livre e a sua retirada implica apenas em alteração na sua massa, não ocorrendo qualquer alteração nas propriedades (HART, 1966).

A água de impregnação ou higroscópica é aquela umidade contida nas paredes celulares e que envolve as partículas e filamentos das substâncias da parede celular, preenchendo as aberturas muito diminutas que existem entre estes componentes da parede celular. A água de impregnação está ligada à madeira através das moléculas de celulose por ligações de valência secundária e uma parte deste tipo de água é retida nas microscópicas aberturas existentes entre as moléculas de celulose por meio de forças de capilaridade. Não é possível eliminar a água de impregnação da madeira sem que tenha antes sido eliminada a água livre. Quando a madeira não mais apresentar a água livre, mas as paredes de suas células se apresentarem saturadas de água de impregnação atinge-se o “ponto de saturação das fibras”. Durante o processo de secagem, uma diminuição no teor de umidade da madeira abaixo do ponto de saturação das fibras provoca uma melhoria sensível nas suas propriedades, principalmente na sua resistência mecânica, mas ocorre também uma contração nas suas dimensões (GOMIDE, 1969).

Estes dois tipos de água desempenham funções diferenciadas no processo de secagem da madeira; enquanto a água capilar é mais importante para as propriedades térmicas e elétricas, a água higroscópica age principalmente sobre as propriedades físicas e mecânicas da madeira (SANTINI, 1996).

De uma forma bastante simples, pode-se dizer que a água se desloca de regiões de alto para as de baixo teor de umidade. Na forma líquida ou na forma de vapor, a umidade se movimenta pelas aberturas naturais da madeira e através das paredes celulares. Basicamente,

a secagem da madeira consiste na remoção da umidade da sua superfície ao mesmo tempo em que ocorre o movimento da água do interior para o seu exterior. As trocas de energia são a causa fundamental dos deslocamentos da água na madeira.

### 2.3.2 - Movimento da água na Madeira

#### 2.3.2.1 Capilaridade

O mecanismo de movimento da umidade na estrutura celular durante a secagem é complexo e requer um estudo detalhado de física da água e da madeira (CECH & PFAFF, 1977). Para melhor compreender este processo, pode-se considerar o fluxo de água na madeira sob dois aspectos: acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF).

O movimento de umidade acima do PSF é um fenômeno totalmente diferente do movimento abaixo deste ponto, e geralmente segue as leis capilares (HART, 1966). A força capilar provoca um fluxo de água livre através de cavidades, espaços e pontoações de uma célula para outra à medida que a água livre das cavidades celulares é progressivamente removida, outras forças de secagem começam a operar. A força capilar age no centro da madeira e diminui gradualmente conforme o teor de umidade das células internas aproxima-se do PSF. De acordo com STAMM (1967), o movimento de água livre acima do PSF é altamente dependente da temperatura, da presença de ar no sistema e do tamanho máximo da abertura da pontoação. HART (1966) afirma que a existência de uma bolha de ar dentro da cavidade celular, devido a pressão do ar mais pressão de vapor d'água produzidas pelo aquecimento, pressiona a água através das pontoações das células adjacentes provocando o seu movimento. As leis capilares consideram ainda que quanto maior o raio capilar maior é a tração da coluna d'água no mesmo e, em consequência disso menor é a tensão capilar, o que resulta numa redução do fluxo. O movimento acima do PSF continua enquanto houver uma cadeia de moléculas d'água inteira nas células próximas ao centro da madeira, e cessa tão logo esta cadeia é quebrada pela diminuição no teor da umidade (STAMM, 1962).

Segundo KOLAMANN & CÔTÉ (1968), acima do PSF, o movimento de umidade do interior para a superfície é causado por forças capilares, e segue a lei de *Poiseuille*, a qual descreve este tipo de movimento. Em um capilar cheio com determinado líquido, o movimento de água é produzido pelas diferenças existentes em tensão, devido as forças

existentes na superfície do menisco dentro do capilar. A força de tensão “T” em um menisco balanceado de um capilar com raio “r” pode ser calculada utilizando-se a equação abaixo demonstrada:

$$T = H * d = \frac{2\beta}{d * r} * d = \frac{2\beta}{r} \quad \text{Equação 01}$$

onde:

T = tensão capilar, g/cm<sup>2</sup>

H = altura de ascensão do líquido no capilar, cm

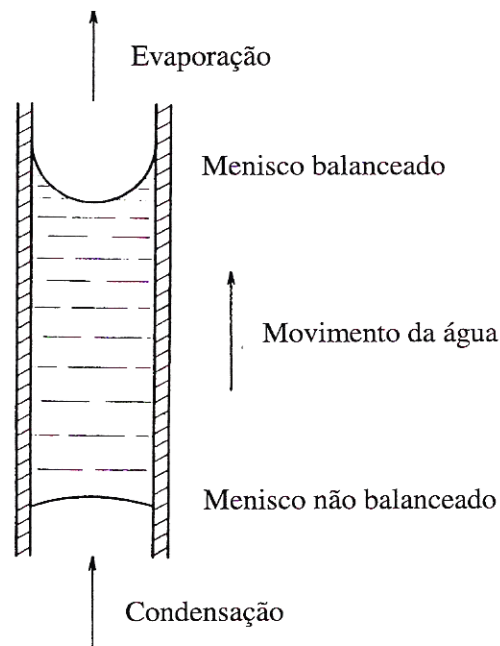
d = densidade da água, g/cm<sup>3</sup>

r = raio do capilar, cm

$\beta$  = tensão superficial da água, g/cm<sup>2</sup>

Pode ser observado na Figura 1, um menisco balanceado e outro não balanceado. A pressão do vapor sobre o menisco balanceado (côncavo) é menor que a pressão de vapor sobre o menisco não balanceado (plano), existindo portanto o movimento de água capilar da direção do menisco mais côncavo em função do gradiente de pressão criado pela evaporação na superfície superior e condensação na inferior.

FIGURA 1. ESQUEMA SIMPLIFICADO DO MOVIMENTO DE ÁGUA EM UM CAPILAR (ADAPTADO DE KOLLMANN & CÔTÉ, 1968)



Segundo STAMM (1964), o movimento capilar é favorecido pelo aumento da temperatura, pela existência de bolhas de ar no interior das células e pelo aumento do diâmetro das pontoações. Quando uma bolha de ar é forçada a passar por uma pontoação, a interface ar-água desta bolha é obrigada a deformar-se, tomando-se uma nova forma esférica e, teoricamente, o raio do menisco fica igual ao raio da pontoação. Portanto, existe um aumento significativo na tensão capilar e uma pressão muito maior deve ser exercida para que o movimento do líquido se processe. Isso faz com que o fluxo capilar seja significativamente reduzido (SIAU, 1977).

### 2.3.2.2 Difusão

A água de impregnação ingressa livremente na região amorfa da celulose onde é adsorvida pelos grupos hidroxila disponível. Na região cristalina da celulose a água adsorvida somente na superfície e não podendo entrar em sua estrutura interna. Ao alcançar o ponto de saturação das fibras são produzidas mudanças de importância nas propriedades físicas da madeira, que incidem no processo de secagem como contração, tensões e condutividade elétrica (STAMM, 1964).

Apesar de ser aceito que o ponto de saturação das fibras gira em torno de 30%, existe uma variação significativa entre as espécies (SKAAR, 1964). Segundo CHOOG (1969), espécies de pinus do sul dos EEUU, apresentam um ponto de saturação variando de 25 à 30% para madeira com baixos conteúdos de extrativos.

JANKOWSKY (1979), concluiu que um aumento na quantidade de extrativos provoca uma diminuição do ponto de saturação das fibras. As variações podem ocorrer devido a variações na composição química, cristalização da celulose, compactação da parede celular, massa específica e conteúdo de extrativos. Segundo WANGAARD (1969), existe uma correlação negativa entre a massa específica e o ponto de saturação das fibras.

Quando a madeira seca a partir do ponto de saturação das fibras até a condição anidra, esta se contrai e quando se umedece ocorre o inchamento. A água é adsorvida em capas monomoleculares nos pontos polares das regiões cristalinas, onde as cadeias de celulose estão imperfeitamente orientadas. Também é adsorvida como água polimolecular, sobre a superfície dos cristais de celulose formando multicapas. Nas zonas de baixa cristalização a

água pode estar adsorvida sobre moléculas de hemicelulose que rodeiam as fibrilas elementares. Quando a madeira seca, as tensões superficiais resultantes tendem a forçar as moléculas de celulose imperfeitamente alinhadas a aproximarem-se mais e tomar uma orientação mais paralela. As paredes celulares diminuem sua espessura no entanto os lumens mantêm seus diâmetros (CAMPBELL, 1933).

O movimento de umidade abaixo do PSF é geralmente considerado um fenômeno de difusão. As moléculas de água movem-se através da parede celular por um gradiente de umidade, através das cavidades celulares por um gradiente de pressão de vapor, novamente através da parede celular mais seca por um gradiente de umidade, e assim sucessivamente até atingir a superfície da madeira (HART, 1966, CECH & PFAFF, 1977).

A difusão de água abaixo do PSF é considerada complexa porque tanto o gradiente de umidade como o de pressão de vapor se manifestam simultaneamente (STAMM, 1962). O gradiente de pressão de vapor é estabelecido quando grandes partes das forças 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 para as de baixa pressão, passando através das cavidades celulares, câmaras de pontoações, aberturas da membrana da pontoação 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 a evaporar das paredes das células próximas à superfície da peça de madeira. Como a madeira é higroscópica, as paredes celulares mais secas de superfície absorvem umidade das paredes mais úmidas, resultando um fluxo de água das células internas da madeira para as externas. Acredita-se que o movimento de água na forma de líquido se dá através da migração individual das moléculas d'água de um sítio de sorção (grupo OH) para outro dentro da parede celular, por uma série de "saltos moleculares" na direção do teor de umidade decrescente (SKAAR, 1972). Além do peso específico e permeabilidade da madeira, a temperatura também exerce considerável influência nesta difusão (HART, 1966). A velocidade com que ocorre a difusão do interior para a superfície das tábuas afeta diretamente a velocidade de secagem (BROWN & BETHEL, 1975).

Segundo STAMM (1962), a difusão na madeira é um movimento espontâneo de vapor d'água, devido a uma diferença de concentração. A água de impregnação move-se através das paredes celulares por um gradiente de umidade, evapora e atravessa as cavidades celulares por



um gradiente de pressão de vapor, torna a condensar para atravessar as paredes celulares e assim sucessivamente, até atingir a superfície da madeira (HART, 1975). A equação de difusão (relacionado à segunda lei de Fick), é derivada em termos de movimentação da água sob ação das forças capilares. A difusibilidade da massa é desse modo expressa em termos de coeficiente de difusão (HUNTER, 1996).

A difusão de vapor d'água é de dez a mil vezes maior que a difusão d'água higroscópica nas paredes celulares. Ressalte-se que a difusão de vapor d'água a temperaturas abaixo da ebulição tem menor contribuição no processo de secagem devido ao pequeno número de aberturas que ligam as células entre si. Dessa forma, apesar da facilidade de difusão do vapor d'água através das aberturas naturais da madeira, a maior parte do movimento da água ocorre através da parede celular (KOCH, 1972).

A passagem da água de impregnação através das paredes celulares devem-se ao “pulo molecular ao acaso” onde a moléculas pularam de um local de adsorção para outro apenas quando a força atraente e o trabalho de abrir a estrutura da madeira forem maiores que as forças atraentes do local de origem. Logicamente as moléculas adsorvidas na segunda camada ou em camadas moleculares subseqüentes terão mais facilidade de se mudar do que as moléculas da primeira camada. O movimento do vapor d'água através das cavidades celulares, câmaras de pontoações, aberturas da membrana da pontoação e espaços intercelulares é estabelecido quando grande parte das forças capilar cessa ficando nas cavidades celulares apenas ar e vapor d'água, estabelecendo-se assim um gradiente de pressão de vapor resultante de diferenças de umidade relativa do ar confinado nestes espaços e do ar que envolve a madeira (MORESCHI, 1975).

Como o fluxo e o gradiente são variáveis no tempo e no espaço, quando se seca a madeira, a segunda lei de Fick representada a seguir, é a que melhor expressa o fluxo por difusão.

$$\frac{dm}{dt} = Dg \frac{d^2M}{dx^2} \quad \text{Equação 02}$$

Onde:

$dm/dt$  = quantidade de umidade removida (m) na unidade de tempo (t)

$D_g$  = coeficiente de difusão médio ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$\frac{d^2M}{dx^2}$  = variação da umidade na distância (x)

SIAU (1971), afirma que os coeficientes de difusão da água higroscópica sofrem a influência da umidade, temperatura e a massa específica da madeira. Tais coeficientes aumentam com a temperatura e a umidade e diminuem com a densidade da madeira. A elevação da temperatura proporciona energia para as moléculas de água, provocando o seu deslocamento de um local de adsorção para outro.

## 2.4 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA EM SECAGEM DE MADEIRA

O início dos anos 90, foi um período de drásticas mudanças na indústria de madeira sólida. Os seguintes fatores mostram como a indústria tem mudado no cenário da secagem e quais as mudanças tecnológicas serão utilizadas para secagem da madeira no futuro.

- 1) elevação dos preços das toras e da madeira serrada;
- 2) expansão no mercado de madeira serrada de folhosas seca;
- 3) aumento da competição mundial.

Tem crescido a exigência na qualidade da secagem de madeira, exigindo-se tábua clara, um produto de alta qualidade e num correto teor de umidade. Em indústrias familiares existem grandes variações na prática de secagem nos equipamentos e na maneira de operação empregada entre uma e outra empresa. Algumas destas variações refletem diretamente na demanda de mercado, algumas refletem lentamente na maneira de pensar e outras pelos pobres conhecimentos no manejo da secagem da madeira. Novas tecnologias têm sido desenvolvidas procurando melhorar o processo e a qualidade da madeira na secagem, reduzindo os tempos e os custos envolvidos (WENGERT & DENIG, 1995). O tempo necessário para secagem da madeira é influenciado diretamente pela espessura da madeira. Quanto mais espessa mais lenta a secagem, maior o consumo de energia e maior o tempo e

maior serão os custos (SIMPSON & TSCHERNITZ, 1980).

Em países com alta tradição em secagem de madeira como EUA, Canadá, Suécia, Finlândia e Chile, predomina o emprego de programas de secagem com avanço por tempo, em vez dos tradicionais controladores por teor de umidade (sensores elétricos), devido o amplo conhecimento de suas madeiras e equipamentos de secagem. Esta prática facilita a programação da produção no setor de secagem, simplifica os controles e evita a dependência do uso de medidores de teor de umidade da madeira, cujo funcionamento em geral é pouco confiável acima do PSF (JUNTA DE ACUERDO DE CARTAGENA, 1989). As câmaras de secagem utilizadas pelas indústrias atualmente são quase que exclusivamente do tipo convencional, atingido normalmente temperaturas de até 90°C, resultando em boa qualidade de secagem exigida pelas fábricas de móveis (CULPEPPER, 1990). As câmaras de secagem modernas utilizam altas velocidades do ar (acima de 4m/s), duas ou três vezes maiores que as usadas em décadas anteriores, com a finalidade de acelerar o processo de secagem (WALKER, 1993).

Atualmente vários itens de controle utilizam sistemas computadorizados, fornecendo medidas precisas e controlando a temperatura e a umidade relativa e sensores para medição da umidade de equilíbrio através da passagem da corrente elétrica por uma placa de celulose, mais preferível que a medição do termômetro de bulbo úmido (WENGERT & DENIG, 1995).

A velocidade do ar agora pode sofrer variação controlada pela variação da velocidade do motor do ventilador. Programas para otimização da velocidade do ar durante a secagem devem ser desenvolvidos. Um método tem sido utilizado com velocidade do ar variável do ventilador, o qual funciona tentando manter a queda de temperatura na pilha constante através da pilha de madeira ( $\Delta T$ ), necessitando de elevadas velocidades do ar no início do processo e baixas no final (QUARLES & WENGERT, 1989).

RESH, et al (1989), desenvolveram um simulador por computador para determinar com precisão a taxa de secagem utilizando modelos desenvolvidos por HART (1983) e o sistema eletrônico desenvolvido por FORRER (1984), para a secagem de *Douglas fir*. Numa primeira avaliação o simulador mostrou como o coeficiente de difusão variou com o teor de umidade da madeira e num segundo momento, ajustes foram necessários para se chegar a bons resultados entre os dados observados e os estimados pelo simulador.

HART (1983), desenvolveu modelos a partir de um simulador por computador de secagem de madeira no qual a taxa de secagem e a média da umidade das tábuas foram utilizadas para determinar o gradiente de umidade. A simulação forneceu uma ferramenta para modificar o programa de secagem em câmaras, verificando e madeiras de secagem lenta e rápida.

Segundo HOLMES (1989), existem dois fatores no sistema de produção da madeira que afetam estrategicamente as quais são a produção e a humana. O funcionamento efetivo de ambos é necessário para alcançar o sucesso de todo o sistema. Para a produção, sua estratégia para otimizar a qualidade dependerá das espécies, da qualidade da matéria prima do quanto quer produzir e da eficiência de seu equipamento para causar o mínimo de defeito. O controle para secagem da madeira necessita do conhecimento do teor de umidade e que tenha condições de controle da taxa de temperatura, da umidade relativa e da circulação do ar na câmara.

O fator humano dentro das indústrias, na maioria das vezes é subutilizado e negligenciado no seu potencial. Cursos de treinamento em secagem de madeira e trabalhos de consultoria são essenciais para a evolução. Ensinos e trabalhos com os operadores, supervisores e gerentes são fundamentais para que possam ser esclarecidas as dúvidas na secagem da madeira e que todos estejam envolvidos e sintonizados, buscando a otimização da qualidade na secagem, além do conhecimento do equipamento que possuem e as suas possibilidades, assim como a matéria prima que manipulam HOLMES (1989).

Interessantes melhorias na qualidade da secagem tem impulsionado melhorias nas medições do teor de umidade durante a secagem. O mais popular sistema hoje o método resistivo aplicado na madeira (QUARLES & WENGERT, 1989). Atualmente os controladores modernos visam melhorar a qualidade da madeira e reduzir os custos de energia. O controle preciso do processo é o ponto crítico para produção com alta qualidade em com razoável custo (LITTLE & TOENNISSON, 1989). A indústria madeireira sofreu muitas mudanças. O sucesso hoje esta na alta competitividade do mercado globalizado necessitando, maximizar a qualidade dos produtos, aumentar a produtividade, aumentar a flexibilidade para a demanda de diferentes mercado e melhorar o acesso a informação para onde o mercado caminha (MILLER & RILEY, 1989).

Para assegurar a alta qualidade da madeira seca, acurados e consistentes controladores das condições de secagem são essenciais. O monitoramento do teor de umidade na operação tem duas funções.

- determinar quando o programa de secagem deve sofrer mudanças nas fases;
- quando a madeira atingiu o teor de umidade final.

A maioria das indústrias se baseiam na mudança de fase pelo tempo e poucas pelo teor de umidade. Para determinar quando a madeira atingiu a umidade desejada utilizam medidores de umidade elétricos e atualmente utilizam outras variáveis, como o  $\Delta T$ , temperatura da madeira, etc, (MILLER & RILEY, 1989).

Tem-se obtido limitado sucesso com o  $\Delta T$  para determinar o final da secagem. Quando o teor de umidade esta próxima de 8 a 10%, o  $\Delta T$  não apresenta uma boa correlação, mascarando o efeito do  $\Delta T$  no controle do processo. Atualmente os controladores objetivam a medição da umidade em tempo real (RILEY, 1978; TAYLOR & LANDOCH, 1990). Segundo PRICE & KOCH (1981), os procedimentos de secagem atualmente desenvolvidos reduziram drasticamente os tempos de secagem.

SANTINI & TOMASELLI (1997) estudaram o uso da queda de temperatura na passagem da pilha como instrumento de controle do processo de secagem de madeira de *Pinus elliottii* com 25mm de espessura. Os autores concluíram que a queda de temperatura na pilha ( $\Delta T$ ), apresentou uma boa correlação com o teor de umidade apenas nos processos que utilizaram alta temperatura. A aplicação deste sistema de controle necessita ainda de maiores estudos.

A comunicação é básico para o sucesso da secagem da madeira. O recente melhoramento no controle da secagem da madeira tem sido o centro das atenções na indústria madeireira. Com a facilidade da programação e controle do processo de secagem utilizando sistema de controle lógico programado (CLP) microprocessado, alguns cuidados básicos devem ser observados com relação a câmara a ser automatizada antes de se investir num sistema de controle automático. A temperatura e a velocidade do ar devem ser distribuídas uniformemente no interior da câmara para dar condições de controle adequado. Além disso a

carga deverá ser montada e colocada no interior da câmara corretamente (ZIEGLER, 1988).

Segundo HOLMES (1988), o controle eletrônico no processo de secagem da madeira apresenta alguns benefícios, é realizado sem interrupção reduzindo o tempo de secagem. Aumentando o lucro, melhorando a qualidade e aumentando o valor agregado no produto final. Melhora o manejo e o inventário da madeira. Aumenta a satisfação do operador, podendo utilizar melhor o tempo dos operadores e aumenta a flexibilidade na programação das curvas.

HOLMES (1988), utilizou a medição da temperatura interna da madeira como sistema de controle do processo de secagem. Tal medição apresenta um baixo investimento, sendo de fácil implementação na indústria. Foram encontrados resultados satisfatórios no emprego desta tecnologia para controle da secagem.

Os instrumentos de controle e regulação totalmente automatizados alteram as condições climáticas da estufa se faz automaticamente de acordo com o programa de secagem. Isto permite operar um secador continuamente, sem interrupções, obtendo-se assim uma máxima utilização. Os equipamentos de controle e regulação totalmente automatizados disponíveis no mercado, diferem consideravelmente, segundo suas funções e durabilidade. Por esta razão, antes de adquirir um equipamento, deve-se ter em mente a maior quantidade de informações possíveis. A escolha de um sistema apropriado de regulação e controle é uma decisão difícil para o usuário, já que deve possuir uma série de informações técnicas e econômicas (JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA, 1989).

Segundo JANKOWSKY (2000), os fatores que condicionam a eficiência do processo estão relacionados com a espécie de madeira a ser seca, com a preparação dessa madeira para a secagem, com qualidade desejada para a madeira seca, com o secador e com o controle do processo de secagem.

## 2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DE SECAGEM

### 2.5.1 Inerentes ao material

#### 2.5.1.1 Estrutura anatômica

O movimento de água ocorre em diferentes direções. KOLLMANN & CÔTÉ (1968) citam que o fluxo de umidade na direção longitudinal, em madeiras com massa específica média, sob gradiente de pressão de vapor normal, temperaturas superiores a 50° e no limite higroscópico, é de 5 a 8 vezes maior do que na direção transversal. Abaixo do PSF este valor aumenta, podendo o fluxo longitudinal ser de 10 a 15 vezes maior (RASMUSSEN, 1961). No sentido radial, para temperaturas comuns de secagem, a velocidade de secagem é aproximadamente 20 a 50% maior do que no sentido tangencial (KOLLMANN & CÔTÉ, 1958). Os mesmos autores atribuem este fato aos raios lenhosos, e afirmam que em folhosas com grande proporção de células radiais, a difusão neste sentido pode ser até mais do que o dobro da tangencial. Porém, deve-se considerar que dependendo da massa específica, as células de raio contribuem com apenas 2% dos espaços disponíveis para o fluxo de água na madeira, o que é praticamente insignificante.

Segundo COMSTOCK (1970), a água movimenta-se no sentido longitudinal, tangencial e radial e o fluxo de água capilar no sentido das fibras é pelo menos 50 vezes maior que perpendicular às mesmas. Nas coníferas este fato deve-se em parte à presença de canais resiníferos que possuem diâmetros maiores que os demais elementos, enquanto que nas folhosas deve-se principalmente às placas de perfurações dos vasos que da mesma forma apresentam facilidade para o movimento de umidade.

#### 2.5.1.2 Teor de umidade

Segundo KOLLMANN & CÔTÉ (1968), normalmente o tempo de secagem é influenciado pela diferença entre o teor de umidade inicial e final, onde quanto maior esta diferença maior será o tempo de secagem. HART (1966) afirma que o tempo total de secagem aumenta com o aumento do teor de umidade inicial tanto para madeiras altamente permeáveis,

onde ocorre fluxo de massa e a remoção da umidade superficial é o fator limitante, como para madeiras altamente impermeáveis em que a difusão é o fator controlante. Verificou-se que na secagem de suas peças de madeira com teor de umidade inicial diferente, o tempo de secagem é diferente até o PSF, porém quando os centros das peças atingem este ponto, ambas necessitam o mesmo tempo adicional para secar.

Segundo JUNTA DE ACUERDO DE CARTAGENA (1989), o período de aquecimento da madeira normalmente é realizado em ambiente com elevada umidade relativa do ar para evitar sua secagem precoce, este procedimento proporcionou reumidificação superficial da madeira e homogeneizando o teor de umidade inicial entre as peças na câmara.

ZADERENKO (2000), estudando a determinação de tempos de secagem por difusão em câmaras convencionais para *Pinus taeda*, obteve umidade inicial que variou de 76,2 a 185,2%, apresentando um teor de umidade inicial médio de 125,7%. MILOTA & TSCHERNITZ (1990), estudando a taxa de secagem de *Pinus taeda* encontraram valores para o teor de umidade inicial que variaram de 90 à 180%, obtendo um valor médio para as tábuas estudadas de 130%.

PRICE & KOCH (1980), estudando o efeito da espessura dos separadores e da velocidade do ar no tempo de secagem de *Pinus elliottii*, obtiveram valores de teor de umidade inicial que variaram entre as cargas de 90,1 a 116,8%. MUÑIZ (1993), estudando *Pinus taeda* encontrou um teor de umidade inicial de 147,83%. SEVERO (1986), estudando o efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de madeira serrada de *Pinus elliottii* encontrou conteúdos de umidade que variaram de 149,5 a 220,0%, enquanto que SANTINI (1980) analisando o efeito da temperatura na taxa de secagem encontrou valores médios de conteúdo inicial de 55,6% para as amostras de *Pinus elliottii* analisadas.

Segundo KOLLMANN & CÔTÉ (1968), a velocidade de secagem de madeira serrada depende de vários fatores tais como: temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do ar, espécie, tipo de madeira e o teor de umidade inicial, onde grandes variações entre os conteúdos de umidade inicial entre as curvas para um mesmo teor de umidade final desejado podem afetar o tempo de secagem.

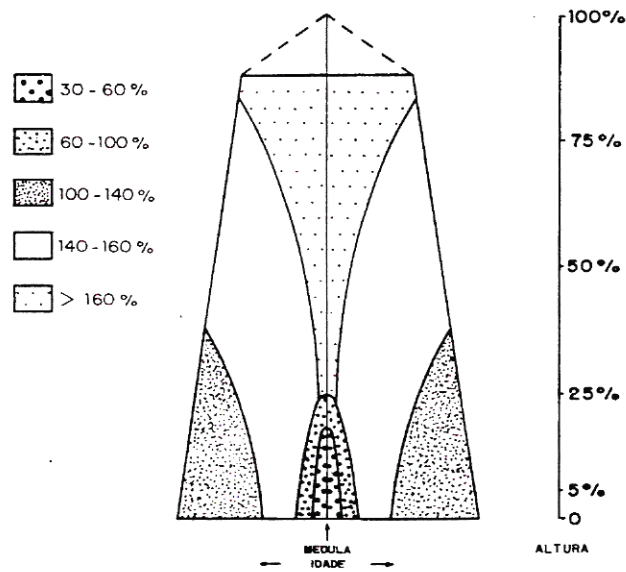
Segundo MUÑIZ (1993), o teor de umidade inicial apresenta uma variação entre o



sentido medula/casca e base/topo consideravelmente na árvore, sendo o principal fator que altera o teor de umidade inicial é o alto teor de umidade no lenho juvenil comparado com o lenho adulto, ocorrendo o inverso com a formação do cerne. O autor concluiu que o alto teor de extrativos associa-se a baixo teor de umidade e que a medida que a idade aumenta o teor de umidade inicial diminui.

Devido à dificuldade de amostrar populações inteiras de diferentes espécies, a informação sobre o teor de umidade da madeira verde é escassa. Para *Pinus taeda* de 30 anos foi encontrado um teor de umidade de 110% e para árvores com menos de 25 anos de 155%, observando-se uma relação inversa com a idade da árvore (CHOONG, 1969). Comparações entre espécies somente têm significado quando se realizam sobre árvores de mesma idade. Segundo MUÑIZ (1993), o teor de umidade inicial varia consideravelmente na árvore, sendo o principal fator o alto teor de umidade encontrada no lenho juvenil quando comparado com o lenho adulto, ocorrendo o inverso com a formação do cerne (Figura 2). O autor concluiu que o alto teor de extrativos associa-se a baixo teor de umidade e que a medida que a idade aumenta o teor de umidade inicial diminui.

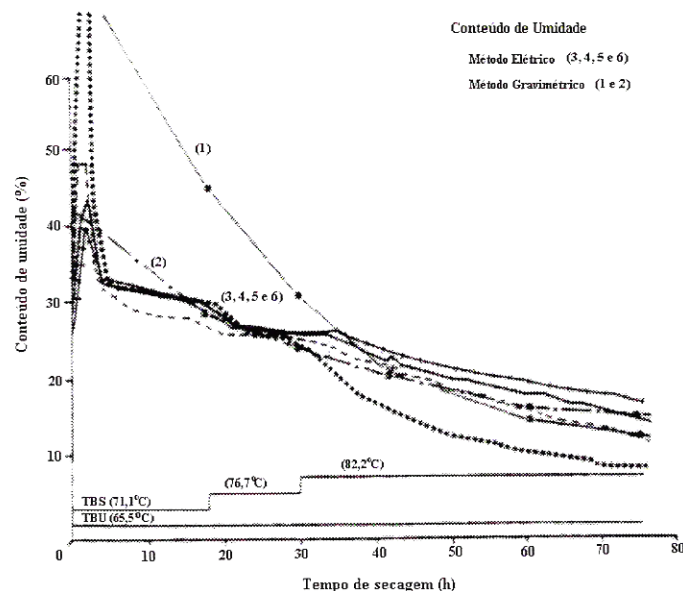
FIGURA 2. DISTRIBUIÇÃO ESQUEMÁTICA DO TEOR DE UMIDADE (%) AO LONGO DO FUSTE E A DIFERENTES POSIÇÕES PARA *Pinus elliottii* E *Pinus taeda*



De uma forma geral, os produtos industrializados da madeira devem ser condicionados a teores de umidade próximas àquelas que deverão alcançar quando em uso (GALVÃO E JANKOWSKY, 1985).

FORRER (1984), desenvolveu um sistema de monitoramento eletrônico (microprocessado) para medição constante dos gradientes de temperatura e de umidade durante a secagem de tábuas de *Douglas fir* em câmara. Pode-se verificar que algumas propriedades básicas dos produtos da madeira são influenciadas, entre todas a qualidade e seus diversos usos. A estabilidade dimensional (associada as tensões internas) e a resistência mecânica (módulo de elasticidade) da madeira podem ser afetadas pela distribuição da umidade e da temperatura durante a secagem. Os resultados obtidos demonstraram que se pode obter ótimos controles dos gradientes de temperatura e de umidade durante o processo de secagem constantemente, necessitando de ajustes através de pesquisas para melhorar a sua performance. Na Figura 3, está representada a distribuição do teor de umidade pelos métodos gravimétrico e elétrico. O ponto crítico ocorreu com 30 horas de secagem quando a madeira atingiu o ponto de saturação das fibras e ambas as curvas de umidade dos dois métodos encontraram-se.

FIGURA 3. DISTRIBUIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DURANTE A SECAGEM EM CÂMARA PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO E ELÉTRICO, COM PROGRAMA DE SECAGEM UTILIZADO.



Segundo HILDEBRAND (1970), a determinação dos gradientes de temperatura e de umidade da madeira são apenas possíveis de serem determinados por métodos destrutivos, retirando-se camadas de uma amostra, não sendo possível a medição em tempo real. Segundo KOLLMANN E HOCKELE (1962), o conhecimento do gradiente de temperatura e da umidade de difusão durante a secagem da madeira é de grande importância para a indústria e para a pesquisa.

Os medidores elétricos medem o teor de umidade da madeira em termos de sua resistência a passagem a corrente elétrica, de forma precisa somente abaixo de 30% (JAMES 1975). As leituras obtidas pelo método, podem ser afetadas tanto pela espécie por diferença de sua estrutura e concentração eletrolítica, como pela direção da grã, teor de umidade, presença de preservativos e retardantes de fogo que na presença da água podem dissociar seus sais aumentando a condutividade elétrica e pela temperatura que, quanto mais alta, reduz sensivelmente a resistência da madeira à passagem da corrente elétrica (KATS & MILLER, 1963; JAMES 1975).

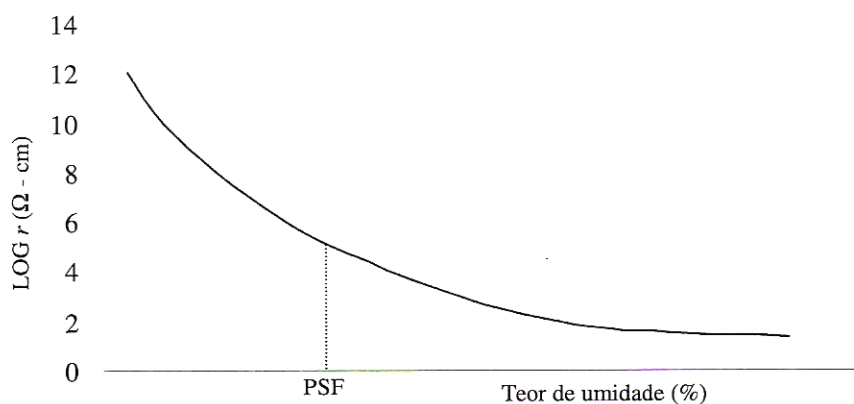
Quanto aos pinos sensores (eletrodos), normalmente sua espessura e distância entre os mesmos, não têm influência qualquer nas medições do teor de umidade, tendo estas variáveis somente a função de melhor ajustamento no momento de cravar os pinos na madeira. Em contrapartida, o comprimento dos pinos e conseqüentemente a profundidade de penetração que estes podem alcançar, influenciam nos valores obtidos do teor de umidade da madeira, pois, medidores elétricos não oferecem leituras do gradiente de umidade ao longo dos eletrodos e sim o teor de umidade no ponto de medição (KATS & MILLER, 1963; JAMES 1975).

Os fatores que contribuem para redução da confiabilidade dos aparelhos elétricos acima do ponto de saturação das fibras (PSF) são a variação da resistividade com o teor de umidade ser relativamente pequena acima do PSF (Figura 4) e a sensibilidade dos medidores ser muito reduzida. A variação no conteúdo de eletrólitos na água nas cavidades celulares entre tipos de madeira, e mesmo de um ponto na madeira para outro na mesma amostra, causa grandes variações em resistividade.

Muitos pesquisadores citam o intervalo com pequenas variações, como sendo o mais indicado para medição do teor de umidade da madeira (CHEN et al 1994; MAKAY 1976;

HOLMES & FORRER, 1989). Quando a madeira está mais seca do que 6% a resistividade é muito alta para ser medida com medidores de umidade comerciais comuns, e quando a madeira está mais úmida que 30%, as alterações em resistividade são muito pequenas para permitir medições precisas. Os medidores tipo resistência são mais úteis na faixa de umidade higroscópica entre 6 a 30% de teor de umidade à temperatura ambiente (SKAAR 1972).

FIGURA 4. LOGARÍTMO DA RESISTIVIDADE CORRENTE CONTÍNUA  $R$  EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE ACIMA E ABAIXO DO PSF (ADAPTADO DE SKAAR, 1972)



Segundo WENGERT (1992), pode ser empregado na secagem da madeira um medidor de umidade em série, para registrar o desempenho e a uniformidade do teor de umidade dentro da câmara. A capacidade atual dos instrumentos inclui compilação do teor de umidade de todas as tábuas e fornece gráficos impressos, mostrando a distribuição do teor de umidade nas fileiras de tábuas e nas pilhas. O autor observou que esta informação pode ser plotada em função do local dentro da câmara, dimensão da madeira ou qualquer outra variável importante, para determinar os fatores que causam variações no teor de umidade final.

O teor de umidade final após a estabilização segundo TOMASELLI (1981), não sofre influência da temperatura abaixo de 100°C, somente havendo diminuição significativa com o aumento da temperatura de secagem acima deste ponto. Deve-se levar em consideração a variabilidade do material, esta diminuição ocorre provavelmente devido a pequenas mudanças na estrutura química, em especial a degradação térmica parcial das hemiceluloses (STAMM 1964).

Estudos realizados por SALAMON E MCINTYRE (1969), na secagem até 15% de umidade final encontraram valores para *Western hemlock* variando de 14,2 a 18,7%, para *Western white spruce* variando de 12,6 a 13,6% e para *Douglas fir* variando de 13,3 a 15,1%. SALAMON (1973), na secagem de *Spruce (Picea sp)*, procurando atingir 12% de teor de umidade final obteve resultados variando 7,6 para 17,4% com um desvio padrão de 2,05%.

### 2.5.1.3 Massa específica

Pode-se dizer que, geralmente para madeiras de baixa massa específica a secagem será mais rápida que em madeiras de massa específica alta. Isto porque diminuindo a massa específica, haverá uma redução no volume de paredes celulares onde a água move-se lentamente, e aumentando o volume de espaços vazios por onde o vapor de água move-se rapidamente. O tempo necessário para remoção da água superficial é diretamente proporcional a massa específica, enquanto que no caso da difusão da umidade do interior para a superfície, é proporcional à raiz quadrada do mesmo (HART, 1975). O motivo pela qual o coeficiente de difusão é maior em madeiras de baixa massa específica, é o pequeno volume de parede celular através da qual a água move-se lentamente como um líquido, e o grande volume de lúmes por onde a água passa rapidamente na forma de vapor (BROWN et al. 1952).

Segundo SKAAR (1976), elevadas temperaturas podem afetar a massa específica da madeira causando sua diminuição. Para TOMASELLI (1981) a contração da madeira com o uso de elevadas temperaturas eleva a massa específica da madeira.

Segundo WALKER (1993) *apud* SANTINI (1996), a quantidade de água a ser transportada da superfície e evaporada é proporcional à massa específica e a espessura da madeira, pois um material de alta massa específica tem lúmes menores, deste modo, pode ter um teor de umidade menor do que uma madeira de baixa massa específica. O tempo de secagem é proporcional à quantidade de água a ser removida e inversamente proporcional a taxa de evaporação. Com isso, o tempo de secagem também é proporcional à massa específica da madeira e a espessura da peça, onde a quantidade de água a ser removida é definida em termos de teor de umidade inicial e pela velocidade do ar.

#### 2.5.1.4 Espessura da madeira

A taxa de difusão é proporcional ao gradiente de pressão de vapor, e como o gradiente é inversamente proporcional a espessura da madeira, a taxa de difusão também o é (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968). Evidentemente, o tempo de secagem de um material espesso é maior do que de um material com menor espessura. Uma aproximação teórica sugere que o tempo, sob condições de secagem semelhantes, é uma função de espessura ao quadrado, sendo que o efeito da espessura é levemente menor no caso de secagem em estufa. Deste modo, o tempo de uma peça de 50mm de espessura é 3 a 4 vezes maior do que uma peça de 25mm (MCMILLEN & WENGERT & LAMB, 1988). HART (1966), confirma que considerando o fluxo de massa, o tempo necessário para uma certa redução no teor de umidade é diretamente proporcional a espessura da madeira. Com relação a difusão do interior para a superfície, o tempo de secagem é diretamente proporcional ao quadrado da espessura. Segundo HART (1966); RIETZ e PAGE (1971), quando o fator limitante é a remoção da água higroscópica, o tempo de secagem é diretamente proporcional ao quadrado da espessura da tábua e ao quadrado da massa específica característica da espécie de madeira.

HILDEBRAND (1970) considera como regra geral, o tempo de secagem da madeira é diretamente proporcional à espessura da peça elevada à potência 1,5. Alguns autores sugerem potências de 1,25 a 1,7. A mesma potência deve ser aplicada à massa específica da peça, uma vez que a espessura e a massa específica têm o mesmo efeito sobre o tempo de secagem. Para uma mesma espécie, com duas espessuras diferentes, sob a mesma condição de secagem, o tempo de secagem pode ser calculado pela equação:

$$T_2 = T_1 \frac{C_2^{1,25*}}{C_1} \quad \text{Equação 03}$$

Onde:

$T_2$  = tempo estimado para secar a tábua de espessura 2 (h)

$T_1$  = tempo gasto para secar a tábua de espessura 1 (h)

$C_2$  = espessura da tábua 2 (mm)

$C_1$  = espessura da tábua 1 (mm)

\*há divergências com respeito ao expoente 1,25, alguns autores sugerem de 1,5 a 1,7.

Estudos realizados por TOMASELLI (1981), sobre os aspectos físicos da secagem de *Pinus elliottii* com 25mm de espessura, apresenta valores relativos de contração em largura que variaram de 2,17 a 2,42%. ARAYA & HERNANDEZ (1993) estudando a secagem de *P. radiata* encontraram uma contração média na largura de 4,05% com um desvio padrão de 0,8%. TOMASELLI (1977), analisando o efeito da secagem encontrou para a contração em largura 1,20% para o lenho juvenil e adulto.

Segundo TOMASELLI (1981), a contração em espessura foi maior com o aumento da temperatura somente quando utilizou temperaturas acima de 100°C, enquanto a contração em largura não apresentou nenhuma tendência.

Segundo HANN (1964), independente da orientação (radial ou tangencial) a contração é maior na espessura do que na largura somente quando aplicada temperatura acima de 60°C. Semelhantes resultados foram encontrados por SANTINI (1980). Segundo HANN (1964), a contração em espessura é maior porque as células da superfície são restringidas a contraírem na largura pelas células do interior (que ainda se encontram acima do ponto de saturação das fibras), enquanto que podem contrair livremente em espessura.

## **2.5.2 Inerentes ao ambiente**

### **2.5.2.1 Temperatura**

O calor é a fonte da qual as moléculas de água na madeira adquirem a energia cinética necessária para provocar a evaporação. A temperatura também influencia a umidade relativa do ar, aumentando a pressão de saturação do vapor de água, ou seja, aumentando a capacidade do ar em receber água evaporada da madeira (RASMUSSEN, 1961; HILDEBRAND, 1970 e CECH & PFAFF, 1977).

A secagem se processa do interior para a superfície; se a temperatura for constante, a taxa de evaporação diminuirá gradualmente à medida que diminui o teor de umidade da madeira e aumenta a pressão de vapor do ar. Por esta razão, para manter a taxa de secagem constante, deve-se aumentar progressivamente a temperatura para fornecer a energia adicional às moléculas de água ou reduzir a umidade relativa da estufa (menor pressão de vapor).

Para KOLLMANN & CÔTÉ (1968), em geral, quanto maior a temperatura maior a velocidade de secagem, pois o calor é a fonte da qual as moléculas d'água da madeira adquirem energia cinética necessária para provocar a evaporação, a qual depende tanto da quantidade de energia fornecida por unidade de tempo, como da capacidade do ar de adsorver umidade. No entanto deve-se observar certos limites de temperatura para que não ocorra a degradação térmica da madeira.

Segundo CECH & PFAFF, 1977, de maneira geral, quanto maior a temperatura, maior é a taxa de secagem, e em conseqüência, menor o tempo de secagem. Entretanto, deve-se considerar que nem todas as madeiras suportam temperaturas elevadas. Madeiras de folhosas, por exemplo, espessas e refratárias, quando submetidas a altas temperaturas de secagem apresentaram muitos defeitos. Nesses casos, por ocasião da elaboração do programa de secagem, recomenda-se o uso de temperaturas moderadas no início que poderá ser aumentada posteriormente. Caso a temperatura se mantenha constante durante o processo de secagem, a taxa de evaporação diminui a medida que o teor de umidade da madeira diminui e a pressão de vapor do ar aumenta.

#### 2.5.2.2 Umidade relativa

Com o aumento da temperatura sem adição de umidade, ocorre uma diminuição da umidade relativa do ar porque aumenta a capacidade do ar em reter umidade. Entre a umidade relativa do ar e a temperatura, se estabelece um equilíbrio higroscópico de grande importância para a secagem da madeira, uma vez que através desta relação pode-se controlar e regular o processo de secagem. Aumentando-se a temperatura do ar numa câmara de secagem, a umidade de equilíbrio é reduzida, obtendo-se com isso uma redução no teor de umidade da madeira. Para que a umidade de relativa de ar seja mantida constante durante o processo de secagem, é preciso haver uma troca de ar úmido do ambiente de secagem por ar fresco (HILDEBRAND, 1964).

A umidade relativa do ar é a relação existente entre o total de vapor d'água presente no ar e a quantidade máxima de vapor que o ar poderia absorver a uma mesma temperatura e pressão. Portanto, a velocidade na qual se efetua a evaporação da água na superfície de uma peça de madeira é em grande parte, em função da umidade relativa do ar que está em contato



com a madeira (KOLLMANN & CÔTÉ, 1968).

A madeira é um material higroscópico que reage seguindo as leis dos corpos porosos. Existe uma relação direta entre a temperatura, a umidade do ar e o teor de umidade de equilíbrio do material. A madeira alcança o teor de umidade de equilíbrio quando é mantida em um ambiente constante com temperatura e umidade relativa, devido ao equilíbrio entre as pressões parciais do vapor de água no ar e na madeira. O teor de umidade de equilíbrio não se alcança instantaneamente e o tempo empregado depende de vários fatores, tais como, massa específica, espessura da madeira, quantidade e natureza dos extrativos, umidade inicial, etc. (SIAU, 1984).

A umidade de equilíbrio decresce levemente com o aumento da temperatura, à umidade relativa constante, apesar de que a pressão de vapor de água aumenta rapidamente, quase duas vezes para cada 10°C de aumento da temperatura (SIAU, 1984). A umidade de equilíbrio de uma madeira é sempre mais alta no processo de desorção que no processo de adsorção. Verifica-se tal fato, pela obtenção de duas diferentes isotermas (desorção e adsorção, a uma mesma temperatura e umidade relativa). Ao intervalo existente entre as duas curvas, denomina-se "*histeresis* de sorção". A diferença entre curva de desorção e adsorção depende exclusivamente da umidade relativa e da temperatura (MORESCHI, 1975). A mais provável causa deste fenômeno é devido ao rearranjo das moléculas de celulose e lignina durante a secagem inicial, quando as hidroxilas seriam deslocadas para uma menor distância entre si, estabelecendo pontes de hidrogênio, e deixando portanto de estar disponíveis para atrair e reter moléculas de água (GALVÃO & JANKOWSKY, 1985).

#### 2.5.2.3 Velocidade do ar

O fluxo de ar através de pilha de madeira tem duas funções básicas: transferir o calor produzido pelo sistema de aquecimento para a superfície da madeira e transportar a massa de vapor d'água desta superfície para a atmosfera (HILDEBRAND, 1970). O efeito da circulação do ar na taxa de transferência de calor é mais pronunciado acima do PSF e diminui progressivamente à medida que o teor de umidade da madeira decresce abaixo deste ponto.

De acordo com FRICKE (1968), o uso de altas velocidades de ar é vantajoso para madeiras finas, com elevado teor de umidade inicial e de fácil secagem, pilhas largas, e

quanto se deseja uniformidade de secagem. Em contrapartida, baixas velocidades são mais adequadas para madeiras espessas, parcialmente secas e pilhas estreitas. O aumento da velocidade do ar reduz o gradiente de temperatura entre as pilhas de madeira, resultando numa secagem mais rápida e homogênea. Outra consequência, é que mais calor será adicionado ao sistema devido a rapidez de troca térmica o que tende a diminuir o gradiente de temperatura através da pilha, aumentando a taxa de secagem (FRICKE, 1968). De uma maneira geral, quanto maior a velocidade do ar na pilha de madeira, menor é o tempo de secagem. Porém, quando da escolha da velocidade do ar deve-se considerar também outros fatores envolvidos no processo de secagem.

O efeito da velocidade do ar na secagem exerce considerável influência na transferência de calor à superfície da madeira, e na transferência da massa de vapor d'água da superfície para o meio secante e que deve ser controlada durante a secagem. Em razão de sua influência no processo, a possibilidade de variar a velocidade do ar permite estabelecer uma avaliação de sua influência sobre os demais fatores envolvidos na secagem. Todavia, na maioria das estufas atualmente em uso, a alternativa de mudança de na velocidade do ar consiste na modificação da área de passagem do ar através da pilha de madeira, o que é pouco prático (HART, 1975).

Para viabilizar a variação da velocidade do ar, é imprescindível que os motores dos ventiladores funcionem com corrente contínua, o que permite equipá-los com mecanismos de velocidade ajustável. GUERNSEY (1957) estudou o efeito da velocidade do ar e a depressão do bulbo úmido na secagem de 25mm de *Western hemlock* utilizando velocidade variando entre 2,03 e 5,58m/s. Ambos os fatores analisados apresentaram efeito na secagem, mas melhora substancial não foi encontrada no tempo de secagem.

KOLLMANN E SHENEIDER (1961) estudaram intensamente os efeitos da velocidade do ar variando de 1,29 a 11,02m/s em vapor superaquecido usando tábuas de alburno com 19mm de *beech* e *pine*. Seguindo a teoria de secagem por convecção de um material higroscópico encontraram uma taxa de secagem constante na primeira fase sendo mais influenciada pela velocidade do ar. O efeito de elevadas velocidades do ar diminuiu com a evolução da secagem durante o processo.

Segundo TORGESON (1959) e TOMASELLI (1977), no processo de secagem é

necessário quebrar a estratificação da camada limite (camada de ar estagnante) formada em regiões próximas a superfície, onde o fluxo laminar de ar atua como uma camada isolante retardando a evaporação e a transferência de calor. Esta camada de fluxo laminar pode ser reduzida fornecendo um fluxo de ar turbulento correspondendo a uma baixa na resistência térmica e alto coeficiente de transferência de calor, sendo favorável na secagem da madeira.

SALAMON (1965a e 1966) mostrou que economias podem ser feitas na secagem de madeira de 1 e 2 polegadas de *Western hemlock* utilizando uma velocidade do ar de 4,57m/s comparando com 3,05m/s. SALAMON (1965b) sugere utilizar altas velocidades nos estágios iniciais da secagem seguindo baixas velocidades quando a madeira atingir o ponto de saturação das fibras. Tem sido demonstrado que, sob constante interação das condições de ar que uma constante taxa relativa de secagem pode ser expressa pela depressão do bulbo úmido e pela velocidade do ar, DEDRICK (1965 e 1968). De acordo com esta relação um excelente controle da câmara poderá encontrar uma taxa específica de secagem constante iniciando com uma pequena depressão no início da secagem com elevada velocidade do ar, seguida por uma grande depressão do bulbo úmido correspondendo a baixas velocidades do ar.

WERKSTOFFE & SHNEIDER (1960), estudando a influência da velocidade do ar na secagem de madeira, constataram que a sua influência é muito forte durante o período onde a taxa de secagem é constante (elevado teor de umidade) e durante o período de queda da taxa de secagem vai decrescendo continuamente a importância da velocidade do ar. O ponto em que o teor de umidade para uma velocidade do ar torna-se insignificante varia com a espécie de madeira sendo relativamente pouco afetado em madeiras pouco espessas em condições brandas de secagem e quando apresenta um teor de umidade inicial baixo. Por razões econômicas é importante o conhecimento da mudança da taxa de secagem com a mudança da velocidade do ar nos vários graus de umidade.

Segundo WENGERT & DENIG (1995), velocidades levemente superiores refletem uma tendência atual de iniciar a secagem na câmara quando a madeira estiver com elevados conteúdos de umidade, onde elevadas velocidades do ar resultam numa secagem mais rápida. CARTER & SPRAGUE (1989), comentam que baixas velocidades do ar tendem a elevar a temperatura do termômetro do bulbo úmido, forçando a abertura da ventilação. A abertura do sistema de ventilação aumenta a taxa de evaporação causando altas demandas de vapor durante a secagem da madeira.

Vários pesquisadores, WERKSTOFFE & SHNEIDER (1960), SALAMON (1965b), TOMASELLI (1977), entre outros, constataram que a influência da velocidade do ar é muito forte durante o período onde a taxa de secagem é constante, com elevado teor de umidade e que durante o período de queda da taxa a importância da velocidade do ar vai decrescendo continuamente. Desta forma, em qualquer estágio da secagem da madeira, existe uma velocidade do ar ótima. ARGANBRIGHT (1979), somente recomenda reversão do fluxo de ar para pilhas com largura superior à 2,4m, para pilhas com largura menores não é necessária reversão durante a secagem.

## 2.6 TAXA DE SECAGEM

A taxa ou velocidade de secagem depende tanto dos fatores inerentes ao processo (temperatura, umidade relativa, velocidade do ar), como também dos fatores intrínsecos a madeira. Segundo estudos conduzidos por TOMASELLI (1981) e SANTINI (1980) demonstram que o aumento da temperatura reduz consideravelmente o tempo de secagem, teor de umidade de equilíbrio e consumo de energia.

SALAMON (1973) estudando programa de secagem para *Spruce*, concluiu que durante os estágios iniciais da secagem altas velocidades do ar são necessárias e que baixas velocidades podem ser utilizadas abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) ou aumentando a temperatura ou fazendo uma combinação entre ambos, com isso, aumentou a taxa de secagem acima de duas vezes da encontrada com programas convencionais, sem causar perda de qualidade a madeira em câmara experimental. SALAMON & MCINTYRE (1969) estudaram o efeito da velocidade do ar na taxa de secagem de pilhas com 0,91m de largura de *Western hemlock western*, *White spruce* e *Douglas fir*. Os autores compararam a taxa relativa de secagem para vários intervalos umidade. Elevadas velocidades do ar para umidade de verde até 24%, teve um grande efeito na taxa de secagem. Velocidades do ar tiveram pequeno ou não tiveram efeito algum na faixa de umidade de 20% para 15%. Estes resultados apresentam linhas guias para estas espécies na faixa de umidade de verde até 15% e velocidades do ar de 2,03 para 4,57m/s. STEINHAGEN (1974) não encontrou nenhum efeito da velocidade do ar na taxa de secagem de *yellow popular* com 25mm de espessura abaixo de 40% de umidade concluindo que a taxa de secagem para 1,27m/s foi suficiente abaixo de 40% de umidade. Acima de 40% a mudança da velocidade do ar foi de 1,78m/s para 2,54m/s para

causar uma elevação significativa da taxa de secagem.

Segundo TORGESON (1941), o fluxo laminar somente pode ser evitado empregando elevadas velocidade do ar. Conseguindo-se uma corrente de ar turbulenta se pode conseguir importantes reduções na taxa de secagem reduzido portanto o seu tempo.

TOMASELLI (1977) comprovou a existência de pelo menos dois estágios diferentes durante a secagem da madeira abaixo de 100°C, o qual empregou a mesma metodologia de cálculos descrita pelos autores anteriormente citados. Para que ocorra prosseguimento do primeiro estágio da secagem deverá ocorrer a transferência de água do interior para a superfície da madeira. Estes movimentos seriam predominantemente o movimento capilar e o movimento induzido pela expansão das bolhas de ar existentes no interior da madeira e o seu tempo de duração dependerá da capacidade de transferência de água à superfície para ser evaporada. O primeiro estágio termina quando a quantidade de água enviada à superfície for menor que a quantidade de água evaporada. Para WRIGHT (1961) *apud* TOMASELLI (1981), quando não existir água livre na superfície se inicia a contração da madeira e com ela o aparecimento de tensões internas causadas por gradientes de umidade, sendo interessante que o primeiro estágio da secagem seja mantido o máximo de tempo possível.

Segundo TOMASELLI (1981), a velocidade de secagem dependerá no primeiro estágio da diferença entre a temperatura da superfície da madeira e a do ar circulante, da umidade relativa do ar, porque o ar saturado apresenta maior coeficiente de condutibilidade térmica e da velocidade do ar, pois com aumento da a velocidade do ar o fluxo passa de laminar para turbulento diminuindo o filme de ar estagnante sobre a madeira.

O segundo estágio da secagem é considerado um ponto importante tanto na teoria como no ponto de vista prático. Ele se inicia quando toda a água livre existente na superfície é evaporada, e a temperatura da superfície da madeira é aumentada terminando quando toda água livre do interior da madeira for evaporada. O segundo estágio é considerado extremamente complexo, por existir uma interação entre o movimento de calor para o interior da madeira e o fluxo de massa de vapor do interior para a superfície do material (FLEISCHER, 1953; HART, 1965). A quantidade de água perdida esta em função a raiz quadrada do tempo. Segundo HART (1965), além do fator limitante na secagem durante o segundo estágio ser a quantidade de calor conduzido pela madeira `a linha de evaporação,

deve-se considerar a transferência de calor à superfície, pois de qualquer maneira, o calor ainda tem que ser transferido à superfície. Além disso ainda pode ser considerado a transferência de massa da superfície para o meio ambiente (TOMASELLI, 1977).

O terceiro estágio para FLEISCHER (1953) *apud* TOMASELLI (1981), não é facilmente distinguível do segundo. Ele inicia quando a última porção de água livre é evaporada. Segundo HANN (1964), este estágio é governado pelas mesmas leis de movimento de vapor do segundo estágio, no entanto, à medida que o teor de umidade se aproxima do teor de umidade de equilíbrio com o ambiente, a resistência à evaporação aumenta, diminuindo a taxa de secagem. Segundo TOMASELLI (1981), a distribuição do teor de umidade passa a ser parabólico e a superfície já no início se encontra em equilíbrio com o ambiente. Assume-se que a taxa de difusão em qualquer um dos pontos é proporcional ao gradiente de umidade, e o principal fator limitante passa a ser o movimento de umidade no interior da madeira.

Além dos fatores externos (temperatura, umidade relativa, velocidade do ar) deve-se considerar os a influência das propriedades físicas e a estrutura anatômica da madeira. SANTINI (1996), encontrou um aumento de aproximadamente 24% no tempo de secagem trabalhando com velocidade de 5m/s quando passou a temperatura de 90°C para 70°C e numa velocidade do ar de 2,3m/s nas mesmas condições de temperatura encontrou um aumento de aproximadamente 23%. SEVERO (1986) encontrou em seus estudos um aumento de 59% no tempo de secagem trabalhando com velocidade de 5,5m/s quando passou a temperatura de 80°C para 50°C e numa velocidade do ar de 2,5m/s nas mesmas condições de temperatura encontrou um aumento de 57%. SANTINI (1980) verificou em *Pinus elliottii* que quanto mais elevado for o teor de umidade inicial, maior é a taxa de secagem. Isso também foi observado por TOMASELLI (1977, 1981).

SANTINI (1980) observou que a taxa de secagem no intervalo de umidade de verde até 10%, aumenta linearmente com a temperatura. Estudo semelhante conduzido por TOMASELLI (1977, 1981), com metodologia direcionada para a determinação dos estágios de secagem, demonstraram aumentos significativos na taxa de secagem com o aumento da temperatura. O autor comenta que, no primeiro estágio, a taxa de secagem a 180°C foi cerca de cinco vezes superior à obtida a 80°C. Neste estágio foi observado que a taxa de secagem não aumenta linearmente com a temperatura, como constatado inicialmente por HANN

(1964). Para TOMASELLI (1977, 1981), este fato pode ser explicado em função da diferença de metodologia empregada por HANN (1964), onde entre outros aspectos, a transferência de calor foi feita principalmente por condução, enquanto que neste estudo a transferência de calor foi realizada principalmente por radiação, cuja emissividade varia com a quarta potência da temperatura.

SEVERO (1989) estudando a taxa de secagem em *Pinus elliottii* nos intervalos de umidade verde até 10% e de 30 até 10%, determinou-as pela equação  $y = a, x_b$ , e no intervalo de umidade de verde até 30% pela equação  $y = e_a x, bx$ . Estas equações apresentaram excelentes ajustes de dados, com coeficientes de determinação variando de 0,90 a 0,99. Portanto, dentro das limitações experimentais do estudo, pode-se estimar a taxa de secagem em função das temperaturas para uma determinada velocidade do ar.

HART et al (1986) utilizaram simulação de secagem para estimar a velocidade do ar no tempo de secagem para todas as larguras de pilhas utilizando *Southern pine*. Seus resultados mostraram que o tempo de secagem reduziu gradativamente com o aumento da velocidade do ar de 1,27 para 2,54 para 3,81m/s em temperaturas convencionais

A velocidade do ar influi diretamente sobre a taxa de secagem. Para HILDEBRAND (1970), as velocidades mais econômicas ficam em torno de 2,0m/s. Para SANTINI (1996), é recomendável um certo equilíbrio entre a temperatura e a velocidade do ar, devendo-se considerar que a velocidade do ar é mais importante nos estágios iniciais de secagem, decrescendo esta importância à medida que a madeira se aproxima do teor de umidade de equilíbrio.

MILOTA & TSCHERNITZ (1990) determinaram que a taxa de secagem de tábuas de *single Southern pine* sofre influência com variação da temperatura do TBS e do TBU, velocidade do ar e da espessura da madeira. Desenvolveram e seus estudos uma equação matemática para expressar a correlação da taxa de secagem destas variáveis.

SIMPSON (1997) analisou o efeito da velocidade do ar na taxa de secagem de tábuas com 25mm de espessura de *Eastern white pine*. Utilizou na análise uma equação matemática para correlacionar o teor de umidade com o tempo de secagem. A taxa de secagem aumentou com a velocidade do ar para umidade acima de 40 a 50%. Para conteúdos de umidade abaixo

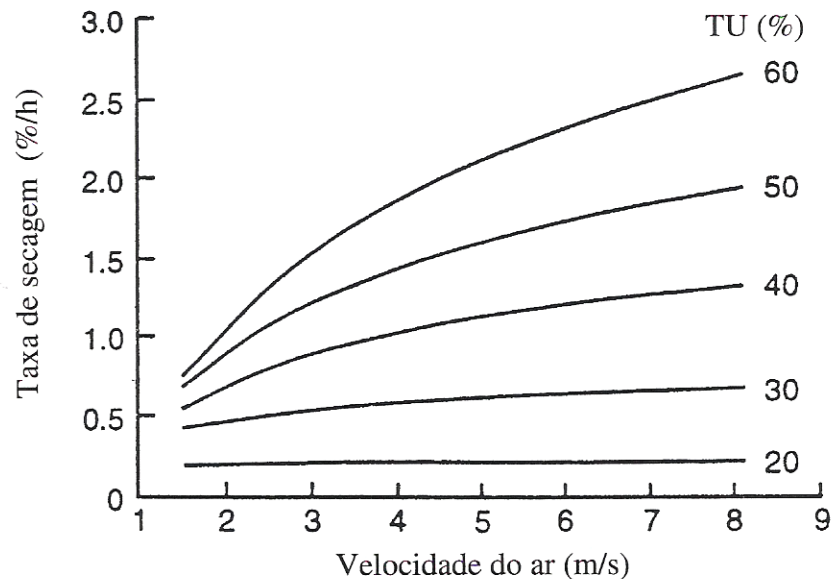
de 80 e 90% a taxa de secagem reduziu gradualmente tornando-se praticamente constante para velocidade acima de 3,05 à 3,56m/s. Os resultados fornecem linhas guias para selecionar experimentalmente velocidades do ar para qualquer etapa da secagem.

O efeito qualitativo da velocidade do ar na taxa de secagem da madeira tem sido bastante estudado, sendo que esta é mais significativa a altas temperaturas do que em processos convencionais. Nos processos convencionais o efeito da velocidade decresce rapidamente próximo do ponto de saturação das fibras (PSF), justificando, portanto a necessidade de maiores estudos sobre a influência da velocidade do ar abaixo do PSF, podendo com isso reduzir os custos na secagem (KOLLMANN & SHENEIDER, 1961).

A importância que concerne à evaporação da água e o seu movimento interno até a superfície mudam durante a secagem da madeira. Está mudança afeta a relação entre a velocidade do ar e a eficiência da secagem. Altas taxas de evaporação pela superfície são dominantes no início do processo, período de constante taxa de secagem, necessitando altas velocidades do ar nesta etapa. A seguir, o movimento interno da água, período de diminuição da taxa de secagem, gradualmente assume o domínio do processo podendo ser reduzida a velocidade do ar. Assim, em qualquer estágio da secagem da madeira, existe uma velocidade do ar ótima. Valores abaixo dos valores ótimos geram ineficiência da capacidade das câmaras, aumentando a perda de calor e podendo causar manchas na madeira. Acelerando o processo de secagem pelo uso de valores acima do ótimo necessário, ocorrem perdas de energia elétrica pelos ventiladores, impondo desnecessário uso do sistema motor/ventilador, (SIMPSON, 1997). Na Figura 5, pode-se observar a influência da velocidade do ar na taxa de secagem obtida por SIMPSON (1997).



FIGURA 5. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR NA TAXA DE SECAGEM (ADAPTADO DE SIMPSON, 1997)



O conhecimento dos efeitos da velocidade do ar na taxa de secagem serve para determinar a sua necessidade ideal. Se a velocidade ótima do ar for conhecida para cada etapa do programa de secagem, as velocidades podem ser especificadas assim como as temperaturas do bulbo seco (TBS) e temperaturas do bulbo úmido (TBU), durante a condução da secagem de madeira. Com a otimização das variáveis acima mencionadas maior eficiência no processo será alcançada, reduzindo os custos com a secagem e aumentando a capacidade produtiva da indústria (BRUNNER & HILDEBRAND, 1987).

Segundo BACHRICH (1980), a temperatura a umidade relativa e a velocidade de circulação do ar são os três fatores que influenciam a taxa de secagem. Com isso, a taxa de secagem pode ser manipulada pela redução da umidade relativa do ar ou aumentando a velocidade do ar no início do processo, quando a madeira apresenta elevado teor de umidade até que a mesma atinja o ponto de saturação das fibras (PSF). Com a elevação da velocidade do ar ocorre a elevação da taxa de secagem. Em contraste, a partir do PSF até o teor de umidade final muito menos água será retirada da madeira por hora, reduzindo a taxa de secagem. Para acelerar o processo, aumenta-se a diferença entre os termômetros de bulbo seco e úmido (TBS e TBU), deixando o clima mais seco no interior da câmara. A partir desse

ponto deve-se elevar a temperatura e abaixar a velocidade do ar durante a secagem da madeira.

A taxa de secagem é influenciada por uma série de fatores relacionados com a própria madeira, com a pilha, e com as condições de secagem. Sabe-se que, de uma maneira geral, madeiras duras secam mais lentamente que as macias ou madeiras de coníferas, basicamente devido à sua estrutura anatômica. Além disso, independentemente do tipo de madeira, o tempo de secagem aumenta com a espessura da peça. Com referência ao empilhamento, a taxa de secagem está estreitamente relacionada com a circulação de ar (FINIGHAN, 1960).

A influência da velocidade do ar na taxa de secagem é bem conhecida foi estudada por vários pesquisadores (FRICKE, 1968; GUERNSEY, 1957; HART, 1965; KOLLMANN E CÔTÉ, 1968; TORGESON, 1941). Dois fenômenos físicos de transferência estão envolvidos no processo de secagem transferência de calor do ar para a superfície da madeira e de transferência de massa de vapor de água para o ar (LYMAN 1965). Segundo KOLLMANN & SHNEIDER (1961) *apud* TOMASELLI (1977), em termos de estágios de secagem a velocidade do ar tem maior influência durante o primeiro estágio, onde a taxa de secagem é constante. A influência embora seja menor no segundo estágio, esta presente com menor intensidade. No terceiro estágio a influência da velocidade do ar é mínima. Segundo BAI & GARRAHAN (1984), variações do teor de umidade e na taxa de secagem resultam em variações na medição do gradiente de umidade na madeira.

## 2.7 DEFEITOS CAUSADOS PELA SECAGEM

Segundo WENGERT & LAMB (1988), a degradação reduz a qualidade da madeira e o valor devido à grande quantidade de defeitos aparentes como, rachaduras superficiais de topo e internas, empenamentos em geral e descoloração.

Os defeitos de secagem apresentam 5 causas principais.

- 1) com a secagem muito rápida, parecerão trincas de superfície e de topo e rachaduras internas.

- 2) secagem muito lenta poderá resultar em mancha e descoloração na madeira, podendo aumentar drasticamente os empenamentos.
- 3) o gradeamento inadequado agravará os empenamentos e a circulação de ar na câmara afetando o controle do teor de umidade.
- 4) erros de operação, uso de programas inadequados, acondicionamento impróprio, etc.
- 5) fatores relacionados a madeira, como tensões de crescimento ou infecção por bactérias, poderão causar empenamentos e rachaduras respectivamente.

A chave para minimizar a maioria dos defeitos de secagem é controlando a taxa de secagem excluindo os itens 3 e 5. Uma operação de secagem tem como limite potencial de perdas no processo não mais que 2% no valor da madeira.

Madeiras serradas de rápido crescimento (pinus do sul) sofrem excessivos empenamentos durante a secagem (KOEHLER, 1938), cujas principais causas são: ângulo fibrilar, porcentagem de lenho juvenil, madeira de compressão, características dos anéis de crescimento, tamanho da medula, desvio da grã e a qualidade da madeira (SIMPSON & TSCHIENITZ, 1998).

GABY (1972), concluiu que os pinos do sul contendo a medula sofreram empenamentos severos, reduzindo excessivamente a qualidade da madeira e também por apresentarem no terceiro ou quarto ano madeira de compressão. BALODIS (1972), constatou que empenamentos severos são causados pela presença de grã espiralada SHELLY & BIRNBACH (1979) contataram que a presença da medula em *Pinus ponderosa* afetou fortemente os empenamentos nas peças de madeira. VOORHIES & BLAKE (1981), concluíram que a madeira juvenil e de compressão da madeira jovem de *P. ponderosa* foram a principal causa dos empenamentos.

A presença da macha superficial sofre uma influência direta da temperatura de secagem e da velocidade do ar (TOMASELLI, 1980 e SEVERO, 1986). Segundo SHNEIDER, (1972) e TOMASELLI (1977), a intensidade da mudança da coloração da superfície da madeira é correlacionada com a temperatura de secagem e com o teor de

umidade final. A temperatura próxima à superfície da madeira é afetada por estes dois fatores. Maiores temperaturas na madeira no estágio final da secagem são obtidas a medida que se aumenta a temperatura e diminui-se o teor de umidade. Segundo HANN (1964), com aumento da temperatura ocorrem maiores degradações térmicas dos extrativos e materiais protoplasmáticos trazidos à superfície da madeira.

Segundo TOMASELLI (1981), em geral a madeira apresenta um escurecimento com o aumento da temperatura de secagem. A intensidade deste escurecimento foi mais acentuada com o aumento da temperatura e as amostras com menores teores de umidade final apresentaram maior escurecimento superficial.

A mancha marrom é formada na linha de vaporização, logo abaixo da superfície, onde se concentra o conteúdo celular que não sofreu vaporização. A mancha é evidenciada após o aplainamento da madeira, podendo penetrar 2 a 3 mm. Portanto, a sua remoção implica em perda acentuada de material, sendo necessária a remoção de 3-4 mm de cada lado da tábua (KOCH, 1972). A mancha marrom é comum em algumas espécies de pinus. Nos EUA uma das espécies mais susceptíveis é o *White pine*. No Brasil, a primeira notícia da propensão do *P. taeda* e do *P. elliottii* à mancha marrom é de 1981. O problema limitou a utilização do processo de secagem a alta temperatura (acima de 100° C) e até mesmo, da secagem convencional para móveis e produtos de maior valor agregado em geral, TOMASELLI (1981).

Segundo MILLETT (1952), a formação da mancha marrom é favorecida pelas temperaturas elevadas em consequência do aumento da solubilidade e posterior oxidação dos extrativos, os quais são transportados a superfície através do fluxo capilar depositando-se à medida que a água se evapora. PEREIRA (1992), estudando a formação e controle da mancha marrom na madeira serrada concluiu que sua coloração evoluiu de amarelo-pálida, a 50°C, para marrom escuro, a 110°C. TOMASELLI (1988), relatou a ocorrência da mancha marrom em *Pinus taeda* e *P. elliottii* e observou que a coloração natural, obtida a 50°C, alterava-se para amarela e marrom quando a secagem era conduzida a 60°C e a 120°C, respectivamente. O autor recomenda programas de secagem moderados, com temperatura abaixo de 60°C e de umidade relativas baixas, especialmente nos estágios iniciais da secagem. Para TOMASELLI (1988), encontrou em peças com 50mm de espessura coloração mais escura que às de 25mm, para eliminá-los foi necessário remover até 10mm nas primeiras e de 4 a 5mm nas demais.

A indústria de móveis brasileira baseada em madeira sólida de *Pinus* tem sido afetada constantemente por tal problema, pois qualquer descoloração que comprometa a cor natural da madeira compromete a qualidade do produto. A dificuldade é que a mancha marrom somente é percebida depois de processada a madeira ou muitas vezes, somente após o acabamento final do produto, o que implica em elevadas perdas e conseqüentemente, maiores custos de produção. Para evitar ou minimizar a presença da mancha marrom devem ser empregados programas de secagem de baixa temperatura podendo-se utilizar temperaturas elevadas após a madeira atingir o PSF.

Para se evitar uma excessiva contração em serviço a madeira deverá ser seca a principio para ser remanufaturada. É no final da secagem que ocorre o endurecimento superficial (*casehardening*) devido a diferença de tensões entre a superfície e o centro da peça de madeira. Na superfície a madeira apresenta tensões de compressão e no centro com forças de tração. Quando a madeira neste estado é serrada ou aplainada desigualmente nas superfícies a forma final poderá ser destorcida. Para eliminar o endurecimento superficial a madeira deverá sofrer o acondicionamento para diminuir as tensões de secagem (FULLER, 1995).

Segundo GALVÃO E JANKOWSKI (1985), o gradiente de umidade varia com a permeabilidade da madeira e com o período de tempo de secagem. O período de tempo influi nas características do gradiente, que decresce à medida em que a secagem progride. Considerando-se que a difusão da umidade é proporcional ao gradiente abaixo do ponto de saturação das fibras, a rapidez tende a diminuir no tempo. O gradiente de umidade está diretamente relacionado à rapidez na secagem, originando as forças que movem a água higroscópica. A diminuição do gradiente, no tempo, reduz a rapidez de secagem à medida que esta se desenvolve. Segundo SIAU (1971), o coeficiente de difusão transversal da madeira é inversamente proporcional à espessura da parede celular.

Segundo JUNTA DEL ACUEDO DE CARTAGENA (1989), a secagem da madeira somente ocorre pela formação de gradientes de umidade. Quando não existir gradientes não existe a secagem. O gradiente de umidade é principal responsável pela formação dos defeitos de secagem, sendo importante estabelecer um gradiente ótimo sem correr riscos de causar danos a madeira. Um gradiente de umidade elevado significa que a madeira está sob compressão na superfície e tração no interior (SKAAR, 1972, STAMM, 1964), sendo

recomendado o acondicionamento no final do processo da secagem através da elevação da umidade de equilíbrio do ambiente na câmara de secagem. Segundo GALVÃO e JANKOWSKY (1985), o acondicionamento visa aliviar as tensões e evitar deformações permanentes nas peças de madeira, o qual tem sido utilizado pela indústria como parte da programação do controle da qualidade da madeira para identificar o endurecimento superficial na madeira (FULLER, 1995), o qual tem sido utilizado por década para determinar o grau de alívio das tensões e não tem efetivamente um método padrão para apresentar seus resultados. Foi descrito por vários pesquisadores (BRAMHALL & WELLWOOD, 1976; PAGE, 1973; WENGERT, 1990; SIMPSON, 1991). Os resultados obtidos são normalmente avaliados apenas visualmente. Quando estão com os dentes dos garfos curvados para o centro da peça apresentam endurecimento superficial (pequeno ou severo), indicando falta de acondicionamento. Ou com reversão das tensões quando os dentes dos garfos curvam-se para fora, indicando excesso de acondicionamento e quando os garfos estão retos significando que a madeira esta livre de tensões.

Dois fatores devem ser considerados na interpretação e entendimento das tensões: A adsorção-mecânica e a migração da umidade. A soma destes fatores influencia produzindo e alterando o perfil das tensões. O relaxamento da adsorção-mecânica ocorre com a reversão das tensões e muda com o teor de umidade. Durante a secagem, tensões internas desenvolvem-se na madeira como resultado da variação do gradiente de umidade, causando diferentes contrações ao longo da espessura da madeira (MCMILLEN 1963 e YONGS, 1957),

Segundo GALVÃO E JANKOWSKI (1985), a secagem da madeira é um balanço dinâmico entre a transferência de calor da corrente de ar para a madeira, a evaporação superficial da madeira, a difusão de umidade através da madeira e o fluxo de água capilar na madeira. A compreensão dos efeitos divergentes que diferentes fatores tenham sobre este fenômeno constitui a tecnologia da secagem da madeira.

Para TAYLOR E MITCHELL (1989), uma das chaves para limitar os defeitos de secagem da madeira é secar uniformemente. Estudando *Southern pine* os autores encontraram um teor de umidade inicial médio de 104% com uma variação de 54 a 155%, com diferença de massa específica, orientação de Grã (corte tangencial e radial) e das dimensões das peças entre as tábuas. Estas variações em conjunto nas peças contribuem para afetar a taxa de secagem e teor de umidade da madeira no final do processo. A variação no teor de umidade

final da madeira pode ser minimizada utilizando o acondicionamento. O acondicionamento é realizado aplicando condições de temperatura e umidade relativa que correspondem com o teor de umidade desejado para a madeira seca.

## 2.8 CONSUMO DE ENERGIA NA SECAGEM DE MADEIRA

### 2.8.1 Energia térmica

Dentro do complexo industrial de transformação da madeira o processo de secagem é que tem maior participação podendo chegar a 50% dos custos de produção. Com a escassez crescente da energia é necessário cada vez mais o aperfeiçoamento das técnicas de secagem que visem a redução do consumo energético (SEVERO 1986). Contudo técnicas de conservação de energia e melhoria de qualidade do material seco, são medidas que devem ser adotadas para compensar os altos custos do processo de secagem, o que pode ser obtido através do emprego de sistemas de controle eficientes.

O consumo de energia na secagem da madeira pode ser dividido em energia para o aquecimento de todo o sistema, para vaporização e para circulação do ar. O aquecimento é responsável por 80% do consumo total da energia na secagem convencional, (KOCH, 1971). A energia térmica é utilizada como fonte de calor e na forma de vapor no processo industrial (SILVA, 2001).

Segundo KOCH (1972), a escolha do tipo de energia a ser utilizado depende principalmente do custo do processo empregado e do e do tipo de material em produção. Os resíduos gerados na indústria de transformação da madeira é a principal fonte de energia, utilizados para produzir vapor por meio da queima em caldeira fornecendo o calor necessário para aquecimento das câmaras de secagem.

Segundo FRICK (1976) *apud* TOMASELLI (1981), a energia consumida na secagem da madeira é utilizada dividida em energia térmica e elétrica, a energia térmica é para aquecimento de todo sistema e a energia elétrica é utilizada na circulação do ar na câmara. A energia térmica é consumida para aquecimento do ar existente no interior da câmara, aquecimento de toda estrutura da câmara, aquecimento da madeira gradeada na

câmara, aquecimento do ar introduzido pelo sistema de renovação do ar e a energia térmica é consumida para repor as perdas do sistema pelas paredes, teto e portas.

A implantação dos programas Mercado Atacadista de Energia e do Operador Nacional do Sistema pela Agência Nacional de Energia Elétrica, vai incentivar a produção intensa e independente de energia por parte de entidades, que no seu processo industrial geral subprodutos com capacidade de serem empregados na produção de energia. Acredita-se que um número significativo de indústrias podem partir para o sistema de auto-geração de energia elétrica visa o processo de cogeração (TAUTZ, 1998; KNOEDT, 1998; *apud* SILVA, 2001).

Tradicionalmente, a geração de energia térmica (vapor) é a principal demandante de resíduos pela indústria madeireira. Mas como, normalmente a capacidade de geração de energia térmica através dos resíduos produzidos é superior a demanda, ocasionando um excedente de energia. Baseado nisso e aliado à crise energética, a adoção do sistema de cogeração de energia (térmica e elétrica) através do aproveitamento dos resíduos gerados pela indústria madeireira tem se tornado um negócio altamente atrativo (LOPES & WIPIESKI, 2001).

### **2.8.2 Energia elétrica**

A energia elétrica na indústria de base florestal pode ser provida de duas distintas maneiras: aquisição direta de empresas produtoras de energia, como as concessionárias do setor elétrico ou através de produção própria. A primeira tem sido preferida nas regiões onde há fornecimento em tempo integral. Já a segunda maneira é uma saída para indústrias instaladas em regiões que apresentam problemas de fornecimento elétrico em rede, como é o caso de certas localidades mais distantes e isoladas. Como exemplo, determinados pontos da Amazônia, em que o industrial produz a energia elétrica para atender sua própria demanda (SILVA, 2001).

Quando decresce a oferta e o preço da energia aumenta, a economia de energia torna-se uma das variáveis mais importante no processo (CORDER, 1980). COMSTOCK (1975) estimou que na secagem o consumo de energia é 60 a 70% de toda energia gasta na produção da madeira manufaturada. Assim, uma pequena economia de energia na secagem da madeira significa grandes economias no uso total da energia. Segundo WENGERT & DENIG (1995), os custos da energia na secagem da madeira freqüentemente ficam ao redor de 50% dos custos



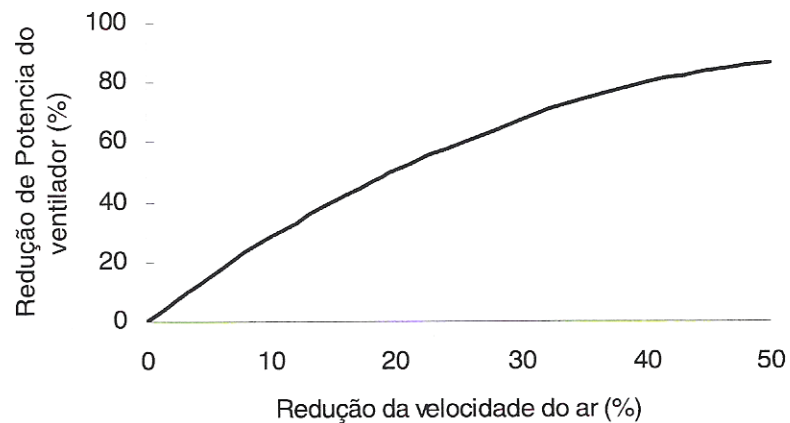
de operação.

A necessidade de melhorar a qualidade do processo e reduzir os custos de secagem, tem aumentado o interesse em medições automáticas e contínuas do teor de umidade da madeira durante a secagem (CHEN et al, 1994). As perdas de energia pelas aberturas de ventilação por ocasião da eliminação do excesso de umidade para a atmosfera podem ser minimizadas pelo uso eficiente de um sistema de controle das variáveis envolvidas no processo. O uso de sistema computadorizado nas estufas de secagem além de eliminar a fonte de erro provocada pela ação do operador, possibilita medições em tempo real mais precisas, (BRUNNER & HILDEBRAND, 1987).

Devido às características dos ventiladores, pequenas reduções na velocidade do ar causam grandes reduções na energia elétrica. Por exemplo, uma diminuição de 25% na velocidade do ar resulta em uma redução de até a 50% na energia (SIMPSON 1997). Da mesma forma GARRAHAN et al (1993) *apud* SANTINI (1996), estudando o efeito da circulação do ar nos custos concluiu que com o uso de mecanismo de controle de velocidade do ar pode-se conseguir uma redução líquida no consumo de energia de até 50% do total consumido. Na Figura 6 pode ser observado o efeito da redução da velocidade do ar na energia consumida pelo ventilador.

KOLLMANN e SHENEIDER (1961) consideram que a influência da velocidade do ar na taxa de secagem é mais significativa a altas temperaturas do que em processos convencionais. Nos processos convencionais o efeito da velocidade decresce rapidamente próximo do PSF, justificando, portanto a necessidade de maiores estudos sobre a influência da velocidade do ar abaixo do PSF, podendo com isso reduzir os custos na secagem.

FIGURA 6. RELAÇÃO ENTRE A REDUÇÃO DA VELOCIDADE DO AR E A REDUÇÃO DE ENERGIA NOS VENTILADORES. ADAPTADO DE SIMPSON (1997)



Segundo VRANIZAN & WOHLGEMUTH (1988), estudaram formas de economizar energia elétrica na secagem de madeira. Um método para reduzir quantidades de energia elétrica na secagem convencional de madeira necessita ser bem desenvolvido e testado; resultados mostram que economias podem ser substanciais. Um método pode resultar em reduções de energia elétrica na ordem de 30 a 50% da energia necessária por carga (Tabela 1). E a redução encontrada não causará sacrifícios no tempo e a qualidade da madeira. O maior custo de energia está na energia elétrica em vez da energia térmica. Normalmente os custos de energia elétrica representam entre 14 e 21% dos custos de secagem.

Segundo VRANIZAN & WOHLGEMUTH (1988) a potência (P) necessária para mover ventiladores está a uma razão cúbica da velocidade, significando que com uma pequena redução na velocidade do ar resulta em significantes decréscimos na potência (kW).

De acordo com WENGERT (1992), os custos de secagem de madeira de conífera numa indústria de lápis é em torno de U\$23,18/m<sup>3</sup>. Os custos referentes a perda de material por defeitos de secagem são estimados em U\$5,51/m<sup>3</sup>, o que corresponde a aproximadamente 24% dos custos de secagem. Para material destinado para fins mais nobres este valor pode ser ainda maior. Se analisarmos que os custos com energia elétrica ficam em torno de 30% do custo de secagem (U\$8,0/m<sup>3</sup>), portanto economia de energia na secagem da madeira pode significar grandes economias nos custos.

TABELA 1. ECONOMIA DE ENERGIA EM CONTROLE AUTOMÁTICO DA VELOCIDADE DO AR NA SECAGEM DA MADEIRA.

SISTEMA PARA CÁLCULO	Carga Número		
	539	546	621
Carregamento de energia normal (kW) <sup>1</sup>	15,8	15,8	15,8
Velocidade normal do ventilador (rpm)	259	258	259
Tempo total	98	80	87
Energia normal consumida (kWh)	1548	1264	1375
Média na redução da velocidade (rpm)	200	212	183
(%)	77,5	82,2	70,9
Média de carregamento (kW)	8,4	9,6	7,3
Consumo de energia (kWh)	945	766	635
Economia de energia (%)	39	39,4	53,8

<sup>1</sup> 15,8kW equivale a 25HP do motor com 85% da capacidade

Os sistemas computadorizados permitem por sua vez, uma variação na velocidade do fluxo do ar circulante dentro da estufa. O alto custo da energia elétrica em geral é muito importante no rendimento econômico do ar circulante na estufa (BRUNNER & HILDEBRAND, 1987

Estudos realizados demonstram que uma variação da velocidade do ar circulante permite uma economia considerável de energia, sem uma prolongação excessiva no tempo de secagem (SCHMIDT, 1984). A cada fase do processo de secagem corresponde uma velocidade ótima do ar e uma velocidade constante significa sempre uma perda de energia. Para evitar uma possível prolongação do tempo de secagem se deve medir e controlar o fluxo de ar dentro da pilha de madeira, com o objetivo de manter uma velocidade mínima que otimize o rendimento econômico do secador.

VRANIZAN & SHINN (2001), especializaram-se em estudos industriais especificamente de transformação da madeira (primária ou secundária), para economizar energia elétrica e térmica apresentam um estudo de redução de consumo de energia elétrica através da velocidade dos motores em ciclones e sistema de exaustão de serragem das lixadeiras que com uma redução de apenas 7,5% na velocidade de um motor com 60HP obteve uma redução de aproximadamente 20% no consumo de energia e num motor de

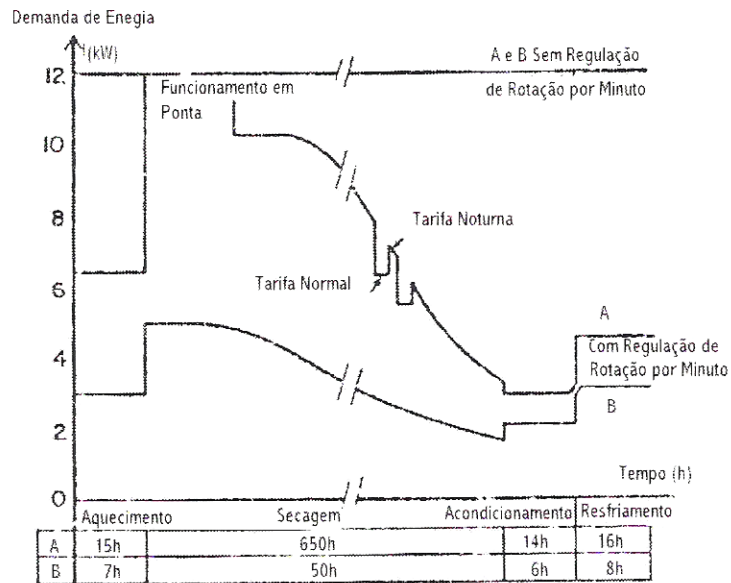
150HP reduzindo 21% da velocidade houve uma redução de 47%.

GUZENDA & OLEK (1992) desenvolveram um sistema de monitoramento da taxa de energia em diferentes estágios da secagem. WENGERT & MEYER (1992), desenvolveram técnicas para economizar energia na secagem, incluindo economia nos compressores, caldeiras, motores e câmaras.

Segundo BRUNNER & HILDEBRAND (1987), hoje em dia predominam os sistemas computadorizados no campo de controle e regulação com equipamentos totalmente automatizados. Estes computadores controlam e regulam não somente o secador, e sim várias estufas de uma vez. Os sistemas computadorizados permitem por sua vez, uma variação na velocidade do fluxo do ar circulante dentro da estufa. O alto custo da energia elétrica em geral é muito importante no rendimento econômico do ar circulante na estufa. A Figura 7, mostra de forma clara a vantagem econômica da variação do fluxo de ar, devido a redução no consumo de energia elétrica nos motores dos ventiladores.

A maior vantagem destes equipamentos é a segurança que oferecem para a madeira a ser seca, como consequência de um controle efetivo do processo de secagem. Computadores com seus circuitos incorporados para controle correto do funcionamento de todos os elementos do secador (válvulas de calefação e vaporização, ventiladores, radiadores, sensores de teor de umidade e umidade de equilíbrio, temperatura do ar circulante e temperatura dentro da madeira, gradiente do secador, etc.), otimizam o rendimento das câmaras ao impor tempos de secagem menores, combinados com uma melhor qualidade do produto final. Estes equipamentos computadorizados reduzem ao mínimo a influência das imperfeições do homem sobre o processo de secagem e seu custo é muito mais econômico quando se trata de uma instalação de várias estufas (JUNTA DE ACUERDO DE CARTAGENA, 1985).

FIGURA 7. DEMANDA DE ENERGIA DOS VENTILADORES PARA DOIS EXEMPLOS DE CÂMARA DE SECAGEM (A PARA FOLHOSAS E B PARA CONÍFERAS) COM E SEM A REGULAÇÃO DA ROTAÇÃO POR MINUTO DOS MOTORES (JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA, 1989)



Estudos realizados demonstram que uma variação da velocidade do ar circulante permite uma economia considerável de energia, sem uma prolongação excessiva no tempo de secagem (SCHMIDT, 1984). A cada fase do processo de secagem corresponde uma velocidade ótima do ar e uma velocidade constante significa sempre uma perda de energia. Para evitar uma possível prolongação do tempo de secagem se deve medir e controlar o fluxo de ar dentro da pilha de madeira, com o objetivo de manter uma velocidade mínima que otimize o rendimento econômico do secador.

## 2.9 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO AR EM FUNÇÃO DA VAZÃO MÍNIMA NECESSÁRIA

Após a câmara de secagem ter passado pelo período de aquecimento, a temperatura da superfície da madeira e, conseqüentemente a temperatura de evaporação da umidade virá a ser a temperatura do termômetro do bulbo úmido (TBU), desde que o ar passando através da pilha de madeira se torna totalmente saturado. O calor necessário para vaporização da água da madeira é fornecido pelo ar aquecido o qual é resfriado ao passar através da pilha de madeira

em função da absorção da umidade evaporada. Desta forma é preciso conhecer o volume de ar mínimo necessário para a secagem da madeira (ELKEMANN & BAKER, 1976).

A influência da velocidade de circulação do ar é muito forte durante o período onde a taxa de secagem é constante (elevado teor de umidade) e que durante o período de queda da taxa de secagem a importância da velocidade do ar vai decrescendo continuamente, (WERKSTOFFE & SHNEIDER (1960), SALAMON (1965b), TOMASELLI (1977), SIMPSON (1997)).

Existem várias metodologias para os cálculos da vazão mínima necessária de ar durante a secagem da madeira. O procedimento para cálculo da vazão mínima de ar durante a secagem pode ser obtido, segundo MISSENARD (1963), ELKEMANN & BAKER (1976), e KINNINMONTH et al (1980).

a) Umidade específica do ar no interior da câmara

A umidade específica do ar se refere à massa de vapor d'água existente no ar por unidade de massa de ar seco obtida através da fórmula a seguir:

$$G = \frac{UR \times P_v}{1,608 \times (P_{at} - UR \times P_v)} \quad \text{Equação 04}$$

Onde:

G = Umidade específica do ar no interior da câmara, (kg de vapor /kg de ar seco);

UR = Umidade relativa, (valor absoluto - UR/100);

Pat = Pressão atmosférica normal, (kgf/cm<sup>2</sup>) (1,04395 kgf/cm<sup>2</sup>);

Pv = Pressão absoluta do vapor d'água, (kgf/cm<sup>2</sup>).

b) Volume da mistura ar seco/vapor d'água por unidade de massa

O volume da mistura entre os volumes ocupados pelo ar seco e pelo vapor d'água por unidade de massa foi obtido pelas fórmulas descritas a seguir, as quais foram ajustadas para o

Sistema Internacional de Unidades (SI), onde, um *mol* de um gás a uma temperatura de 0°C e a uma pressão de 1,033kgf/cm<sup>2</sup> ocupa um volume de 10,16m<sup>3</sup>. Desta forma 13,14 kg de ar (28,97lb) ou 8,17 kg de vapor d'água (18,02lb) ocupam um volume de 10,16m<sup>3</sup> sob as mesmas condições.

- Cálculo do volume de ar seco:

$$\text{Var} = 22,414 \times \left( \frac{\text{Tbs} + 273,1}{273,1} \right) \times \left( \frac{1}{28,97} \right) \quad \text{Equação 05}$$

Onde:

Var = Volume de ar seco ocupado por unidade de massa, (m<sup>3</sup>/kg)

Tbs = Temperatura utilizada em cada fase do programa adotado, (°C)

- Cálculo do volume de vapor d'água foi:

$$\text{Vv} = 22,414 \times \left( \frac{\text{Tbs} + 273,1}{273,1} \right) \times \left( \frac{\text{G}}{18,02} \right) \quad \text{Equação 06}$$

Onde:

Vv = Volume de vapor d'água ocupado por unidade de massa, (m<sup>3</sup>/kg);

Tbs = Temperatura utilizada em cada fase do programa de secagem, (°C);

G = Umidade Específica do ar, (kg/kg).

O volume da mistura ar seco/vapor d'água foi então obtido pela somatória do volume da mistura ar seco mais o volume de vapor d'água ocupado por unidade de massa, calculado pela fórmula:

$$\text{Vt} = \text{Var} + \text{Vv} \quad \text{Equação 07}$$

Onde:

Vt = Volume total da mistura, (m<sup>3</sup>/kg);

$V_{ar}$  = Volume de ar seco, ( $m^3/kg$ );

$V_v$  = Volume de vapor, ( $m^3/kg$ ).

c) Massa de ar seco e vapor d'água por unidade de volume

A massa da mistura ar seco mais vapor d'água foi obtido através da seguinte fórmula:

$$M_m = \left( \frac{1,0 + G}{V_t} \right) \quad \text{Equação 08}$$

Onde:

$M_m$  = Massa da mistura ar seco e vapor d'água por unidade de volume, ( $kg/m^3$ )

$G$  = Umidade específica do ar no interior da câmara, ( $kg/kg$ );

$V_t$  = Volume total ar seco mais vapor d'água ( $m^3/kg$ );

Para obter os valores individuais de ar seco e de vapor de água por unidade de volume utilizaram-se as seguintes fórmulas:

- Cálculo da massa de ar seco por unidade de volume:

$$M_{ar} = \left( \frac{1,0}{1,0 + G} \right) \times M_m \quad \text{Equação 09}$$

Onde:

$M_{ar}$  = Massa de ar seco por unidade de volume, ( $kg/m^3$ )

- Cálculo da massa de vapor d'água por unidade de volume:

$$M_v = \left( \frac{G}{1,0 + G} \right) \times M_m \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$M_v$  = Massa de vapor d'água por unidade de volume, ( $kg/m^3$ )



- d) Quantidade de calor obtido por unidade de volume da mistura de ar seco mais vapor d'água

A quantidade de calor que pode ser obtida por unidade de volume da mistura de ar seco e de vapor d'água, foi calculada pela fórmula:

$$Q_c = M_a \times C_{ea} + M_v \times C_{ev} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$Q_c$  = Quantidade de energia obtida de  $1\text{m}^3$  da mistura, (kcal/kg.°C);

$C_{ea}$  = Calor específico do ar, (kcal/kg.°C);

$C_{ev}$  = Calor específico do vapor d'água, (kcal/kg.°C).

Significa que podem ser obtidos “n” quilocalorias (kcal) a partir de  $1\text{ m}^3$  da mistura ar seco e vapor d'água para cada grau centígrados de abaixamento de sua temperatura em cada fase do programas. Este abaixamento da temperatura da mistura ocorre em função da absorção da umidade evaporada pela madeira durante a secagem.

- e) Volume da mistura de ar seco e vapor d'água necessário para evaporar uma unidade de massa de água da madeira

Segundo ECKELMAN & BAKER (1976), se for considerado que o processo de secagem da madeira é adiabático (sem perda de calor), o calor de umedecimento ou inchamento (calor necessário para separar a água da madeira), por ser muito baixo, podendo ser desconsiderado. Desta forma, o único calor utilizado para evaporar a água da madeira é o calor latente de vaporização que por definição, é a quantidade de calor necessária para transformar a água em vapor no seu ponto de ebulição sem alterar sua temperatura, ou ainda, é a quantidade de energia (kcal) necessária para evaporar a água da madeira. Seu valor normalmente é tabulado em função da temperatura, sendo encontrado na Tabela 2, adaptada de PERRY (1950). O volume da mistura de ar seco e de vapor d'água necessária para evaporar 1kg de água da madeira de *Pinus taeda*, foi obtido pela fórmula:

$$V_m = \left( \frac{C_{lv}}{Q_c} \right) \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

$V_m$  = Volume da mistura (ar seco e vapor d'água) para evaporar 1kg de água, ( $m^3/kg \cdot ^\circ C$ );

$C_{lv}$  = Calor Latente de Vaporização na temperatura da respectiva fase do programa, (kcal/kg);

$Q_c$  = Quantidade de energia obtido com  $1 m^3$  da mistura, (kcal/kg. $^\circ C$ ).

TABELA 2. PROPRIEDADES TÉRMICAS DO VAPOR DE ÁGUA, ADAPTADO DE PERRY (1950)

Temperatura ( $^\circ C$ )	Pressão Absoluta (kg/cm $^2$ )	Volume Específico (m $^3$ /kg)	Calor Latente kcal/kg
20	0,0238	57,81	586,02
30	0,0430	32,91	580,37
40	0,0752	19,54	574,69
50	0,1258	12,04	568,96
55	0,1606	9,58	566,07
60	0,2032	7,68	563,16
65	0,2551	6,20	560,23
70	0,3178	5,05	557,28
75	0,3932	4,13	554,31
80	0,4830	3,41	551,31
85	0,5895	2,83	548,27
90	0,7150	2,36	545,21
95	0,8620	1,98	542,12
100	1,0332	1,67	538,98
110	1,4610	1,21	532,56
120	2,0241	0,89	525,89

Portanto, serão necessários para evaporar 1 quilograma (kg) da mistura “n” m $^3$  de

ar/vapor d'água para cada grau Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) de abaixamento da temperatura.

Como no item anterior, o volume da mistura calculado considera um abaixamento de  $1^{\circ}\text{C}$  na temperatura quando o ar passa pela pilha de madeira ( $\Delta T$ ), entretanto este valor é influenciado pela umidade da madeira, largura da pilha, velocidade do ar circulante, espécie de madeira utilizada, dentre outros fatores. O  $\Delta T$  corresponde ao valor médio da queda de temperatura através da pilha de madeira durante a secagem da madeira (HOLMES, 1988, VRANIZAN & WOHLGEMUTH, 1988). Segundo ZIEGLER (1988), HOLMES (1988), quanto maior a massa d'água retirada da madeira, maior é o  $\Delta T$  ocorrido.

O volume total da mistura (ar seco e de vapor d'água) para a secagem da madeira por hora foi calculado através da seguinte fórmula:

$$V_{tm} = \left(\frac{V_m}{dT}\right) \times QARH \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$V_{tm}$  = Volume total da mistura ar seco/vapor d'água requerido durante cada fase do programa de secagem, ( $\text{m}^3/\text{hr}$ );

$V_m$  = Volume da mistura para evaporar 1kg de água, ( $\text{m}^3/\text{kg}.\text{^{\circ}C}$ );

$dT$  = Valor da queda de temperatura do ar ( $\Delta T$ ) obtido na câmara, ( $^{\circ}\text{C}$ );

$QARH$  = Quantidade de água a ser removida por hora de secagem determinada em cada fase do programa, (kg).

f) Vazão de ar necessária na secagem

A vazão mínima de ar necessária para cada fase do programa de secagem pode ser obtida através da seguinte fórmula:

$$F = \frac{V_{tm}}{T_M} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

$F$  = Vazão de ar necessária durante a secagem, ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$V_{tm}$  = Volume total da mistura ar seco/vapor d'água requerido durante cada fase dos Programas de secagem estudadas, ( $m^3/hr$ );

$T_M$  = Tempo médio determinado em cada fase do programa;

Entretanto, segundo HILDEBRAND (1970) , as perdas de vazão de ar no sistema são da ordem de 30%. Desta forma, a vazão mínima necessária em cada fase do programa foi determinada pela seguinte fórmula:

$$F_T = F \times 1,30 \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$F_T$  = Vazão mínima total calculada por fase, ( $m^3/h$ )

$F$  = Vazão calculada, ( $m^3/h$ ).

## 2.10. INVERSOR DE FREQUÊNCIA

No passado, os motores giravam somente a uma velocidade, essa velocidade era fixada pela frequência de entrada (50 ou 60Hz). Com o avanço da eletrônica de potência, tornou-se possível converter a frequência fixa numa frequência variável para o motor. A estes produtos foi dada a designação de inversores de frequência (SIEMENS, 1999).

O inversor de frequência é um equipamento versátil e dinâmico e dos mais utilizados em processos automatizados, conjuntamente com o Comando Lógico Processado (CLP). É quase impossível achar um segmento industrial onde seja desnecessária a presença de acionamentos estáticos para motores elétricos, ou seja, os inversores de frequência. É um mercado em plena expansão no Brasil. A maioria dos grandes fabricantes já está presente no país. O preço dos inversores hoje caiu bastante tornando-se acessível para vários segmentos da indústria. Acredita-se que deva existir hoje perto de 25 fabricantes desses equipamentos, boa parte destes já com uma base de vendas instalada no Brasil. Os grandes usuários são as indústrias que necessitam de uma velocidade variável constante, destacando-se aquelas situadas no segmento siderúrgico, petroquímico e papel e celulose (YAKSIC, 2001).

## 2.11. INVERSOR DE FREQUÊNCIA NA SECAGEM DA MADEIRA

Segundo CULPEPPER (1990), sistemas computadorizados causaram dramático impacto na área de secagem. Não sendo recomendado a instalação de variadores de velocidades do ar sem que se tenha um sistema computadorizado de controle. Somente desta forma se obtém o menor consumo de energia elétrica e o máximo retorno do investimento do capital.

Segundo CULPEPPER (1990), a redução da vazão abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) reduz os custos de energia elétrica na ventilação em 40 a 50%. A maioria das espécies apresenta um PSF próximo a 30% de teor de umidade. Acima deste ponto a água esta nas cavidades das células e sua remoção são por capilaridade até a superfície da madeira. Para ser evaporada, este é um processo muito rápido e requer movimentação rápida de ar para criar turbulência na superfície e remover a umidade da superfície da madeira. Abaixo do PSF a umidade esta ligada na parede e sua remoção são completamente diferentes. A água se move lentamente por difusão de áreas de alta umidade (interior da madeira) para áreas de baixa concentração de umidade (superfície da peça). Baixas velocidades do ar removerão a umidade da superfície sem afetar a velocidade de secagem. Sistemas computadorizados adotam alguns métodos para detectar o teor de umidade da madeira ( $\Delta T$ , resistência elétrica, célula de carga, etc.) que podem detectar o PSF com precisão e reduzir a velocidade de circulação do ar automaticamente. Mais alguns benefícios são apresentados:

- possibilidade de maximizar a vazão de ar controlando no motor numa amperagem constante. (no início o ar frio necessita de maior amperagem, mas quando o ar aquece a amperagem reduz aproximadamente 10% ou mais);
- possibilita reduzir a vazão de ar suficiente para a secagem da madeira;
- quando o motor é utilizado na reversão do fluxo de ar, parando os ventiladores lentamente em cascata e iniciando revertendo o fluxo da mesma forma, eliminando os picos de energia na linha.
- gera economia diminuindo a tendência de queima do motor (enrolamento), quebra de eixo, substituição dos mancais, etc.

A tecnologia de variar a velocidade do ar é bastante antiga, sendo pobremente utilizada no passado, modernos computadores tem aberto totalmente novas infinitudes de possibilidades de seu uso, é preciso desenvolve-la adequadamente (CULPEPPER, 1990).

Na Tabela 3, pode-se observar um exemplo de calculo de economia de energia pela redução da velocidade do ar, para um secador com 7 motores de 10Hp, operando 8.500 h/ano. O secador trabalhando com velocidade variável trabalhando com ciclo (período) aproximado de:

- 16,6% de ciclo de secagem com velocidade a 100% (900rpm);
- 41,7% de ciclo de secagem com velocidade a 75% (675rpm);
- 41,7% de ciclo de secagem com velocidade a 50% (45 rpm).

As variáveis apresentadas com relação ao ciclo de secagem são representativas de uma câmara padrão.

TABELA 3. ECONOMIA DE ENERGIA ESTIMADA COM A REDUÇÃO DA VELOCIDADE DO AR

ITEM	1º PERÍODO (16,6%)	2º PERÍODO (41,7%)	3º PERÍODO (41,7%)
Velocidade Constante	100%	100%	100%
amps @ 460 VAC	125 A	119 a	98 a
Velocidade Variável	100%	75%	50%
amps @ 460 VAC	125 a	60 a	38 A

Fórmula utilizada para cálculo:

$$KVAH = (3 \times V \times I \times HR) / 100 \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

KVAH = kilovolt / ampere / hora

V = linha de voltagem neutra

I = linha de amperagem

HR = horas de operação

Cálculos:

Total KVAH usando Velocidade Constante

$$\begin{aligned} \text{KVAH} = & \{ [3 \times (460 / 1,732) \times 125 \times (0,166 \times 8.500)] + \\ & [3 \times (460 / 1,732) \times 119 \times (0,417 \times 8.500)] + \\ & [3 \times (460 / 1,732) \times 98 \times (0,166 \times 8.500)] \} / 1.000 \end{aligned}$$

$$\text{KVAH} = 753346 \text{ KVAH}$$

Total KVAH usando Velocidade Variável

$$\begin{aligned} \text{KVAH} = & \{ [3 \times (460 / 1,732) \times 125 \times (0,166 \times 8.500)] + \\ & [3 \times (460 / 1,732) \times 60 \times (0,417 \times 8.500)] + \\ & [3 \times (460 / 1,732) \times 38 \times (0,166 \times 8.500)] \} / 1.000 \end{aligned}$$

$$\text{KVAH} = 417283 \text{ KVAH}$$

Total de economia de energia usando o variador de velocidade em comparação ao uso de velocidade constante.

Economia total : 336063 KVAH, ou seja, 45%.

O investimento no equipamento para economizar energia será retornado (*pay back* simples), dependendo do custo da energia de cada local em particular. Onde a energia apresenta um custo de U\$ 0,07/kWh o “*pay back*” simples será em aproximadamente 8 meses. O segredo para otimizar a conservação de energia elétrica durante a secagem da madeira é conhecendo quando a circulação de ar pode ser reduzida e quanto (VRANIZAN & WOHLGEMUTH, 1988).

### 2.11.1 Inversor ou conversor de frequência

Ninguém sabe ao certo dizer o porquê, mas as palavras “conversor” e “inversor” estão sendo usadas no meio técnico para designar a mesma coisa: acionamento estático para motores elétricos. Não está incorreto dizer conversor, mas dentro da Abinee – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica utilizamos muito mais a palavra inversor (YAKSIC, 2001).

Morfologicamente, tanto inversor como conversor é utilizado para mudar, alterar, transmutar ou trocar. Os primeiros inversores foram lançados no Brasil entre os anos de 1978 e 1979, em vários tipos de indústrias. Demasiadamente grandes e em virtude do preço, esses primeiros inversores eram privilégio de alguns. O número de funções também era extremamente reduzido. A indústria apenas dispunham de acionamentos em corrente contínua, ou em alguns casos, lançava mão de variadores eletromagnéticos. As poucas indústrias que ainda utilizam este tipo de equipamento sofrem com o custo extremamente alto da manutenção e com a falta de peças para reposição (SCHMITZ, 2001).

Segundo RAYMOND (2001) o mercado de inversores no Brasil encontra-se em pleno crescimento, algo em torno de 8% ao ano, o que representa, até 2003, receita de US\$ 75 milhões. Atualmente, apenas 4% dos motores do país possuem algum tipo de variação de velocidade. O país de destaque é o Japão, onde 30% dos motores têm inversores de frequência instalados. Em 1999 foram vendidos no país 46680 inversores de frequência, já em 2000 esse número pulou para 65 mil – um crescimento de 15%. o grande consumo de energia é causado por equipamentos como ventiladores e bombas. Estando apresentada à evolução tecnológica sofrida pelos inversores nos últimos anos, da seguinte maneira:

- 1978 a 1992 – inversores escalares (utilizados para aplicações extremamente simples)
- 1992 a 1995 – inversores vetoriais (podem ser usados para uma gama maior de aplicações. Os preços altos desses equipamentos fizeram com que eles fossem privilégio de algumas empresas).
- 1995 aos dias de hoje – inversores vetoriais de fácil programação e preço mais acessível para uma ampla faixa de indústria. Essa tecnologia presente nesses inversores resolve 80%

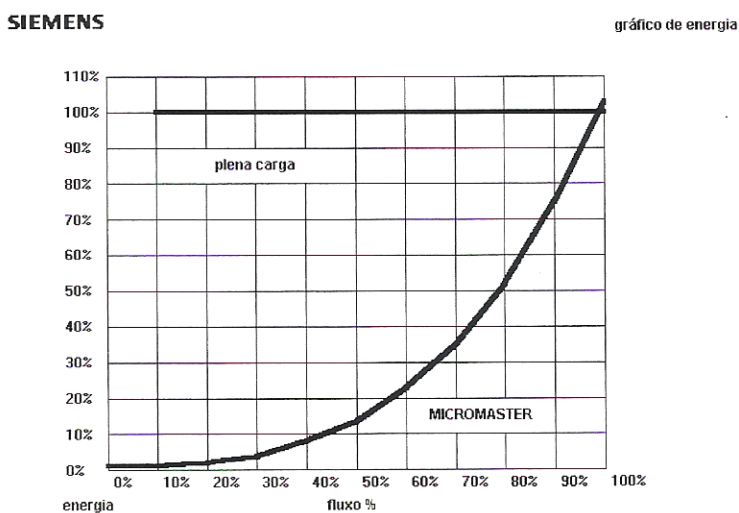


dos casos de controle de velocidade.

Os ventiladores são cargas de binário variável. As cargas de binário variáveis têm uma relação potência/velocidade que é cúbica, ou seja, a velocidade baixa, a potência baixa mais significativamente. Por exemplo, 50% da velocidade em uma carga binário variável terá somente 12% da potência. Devido a essa relação cúbica, podem ser feitas grandes poupanças de energia, se o regime de funcionamento for menor do que o valor nominal do motor. Esta é a forma de economizar energia com um inversor de frequência acoplada a uma carga de binário variável. Ao contrário das cargas com binário variável, as cargas de binário constante, tem uma relação linear entre a potência e a velocidade. Por exemplo, com uma velocidade de 50% e uma carga de binário constante, são necessários 50% da potência. Daí a economia em cargas de binário constante ser menor utilizando cargas variáveis (DEL MONTE , 1980).

A Figura 8 representa a variação do fluxo de ar em função da energia fornecida ao motor num processo de circulação de ar por meio de um ventilador. A curva apresenta duas condições; quando for aplicada a plena carga no motor o consumo de energia sempre será constante. Enquanto que, quando for aplicada variação no fluxo de ar será obtida uma redução no consumo de energia. Pode-se observar que com uma pequena redução no fluxo de ar ocorre uma redução no consumo de energia elétrica bastante significativa.

FIGURA 8. CURVA DE ENERGIA CONSUMIDA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO FLUXO DE AR. OBTIDA DO *SOFTWARE MASTERSAVE* (SIEMENS, 1998).



### 2.11.2 Vantagens e limitações do uso do inversor de frequência

Segundo LOBOSCO (1988), os inversores de frequência apresentam algumas vantagens e desvantagens, apresentadas a seguir:

As principais vantagens são:

- Possibilidade de variação da frequência e conseqüentemente da vazão de ar em ventiladores;
- Rampa de aceleração e desaceleração programável, evitando picos de energia e aplicação elevada de torque no motor, podendo causar o rompimento do eixo do motor no ventilador;
- Controle no acionamento, partida e parada do motor suavemente não havendo desgaste mecânico das chaves estáticas de partida e paradas do motor através de comando microprocessado;
- Conservação considerada de energia, pela redução de consumo;
- Redução na manutenção em mancais, mecânica do motor;
- Corrige o fator de potência ( $\cos\phi$ ), mantendo próximo de 1.

As principais desvantagens são:

- Afetam as harmônicas em semicondutores e em carga não linear, podendo ser tomadas medidas corretivas para evitar seus efeitos.
- Prejuízos ao motor podendo causar a sua queima devido o sobre aquecimento, motores com baixa rotação não podem funcionar com menos que 30Hz;
- O investimento inicial do inversor de frequência é elevado;
- O motor pode ser desclassificado para uso do inversor em função do torque e outras características;
- O uso de muitos inversores pode gerar interferências eletromagnéticas nas linhas

podendo ser irradiada e conduzida alterando os sinais nos Comandos Lógicos Processados (CLP<sub>s</sub>) da fábrica. Pode ser adaptado filtro, cabos blindados para evitar seu efeito.

### 2.11.3 Características operacionais do inversor de frequência

Segundo RAYMOND (2001), algumas características dos motores quando utilizam inversor de frequência devem ser levadas em consideração.

Ruído – ao acionar um motor com inversor de frequência, logo nota-se o ruído característico do motor: um tom agudo e de relativa intensidade. Este efeito é causado pelo conteúdo harmônico de tensão presente na alimentação de tensão fornecida ao motor pelo inversor. Em consequência tem-se o ruído magnético. Aumentando a frequência de chaveamento do inversor para frequências acima de 12KHZ nota-se que existe melhora nesta característica.

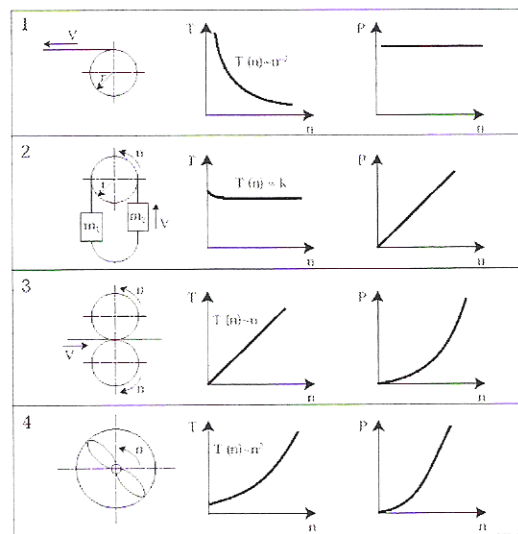
Vibração – outra característica também afetada é o nível de vibração, que aumenta se estiver trabalhando com uma frequência baixa de chaveamento. Assim como no caso do ruído, melhora ao se elevar a frequência de chaveamento.

Rendimento – o rendimento do conjunto motor-inversor, é outra variável que tem sua melhora em função do aumento da frequência de chaveamento do inversor, porém, o rendimento do inversor diminui com este aumento de frequência.

Correntes nos Mancais – Componentes de alta frequência da tensão de modo comum dos inversores de frequência geram um acoplamento capacitivo do motor ao terra, sendo que sua via de descarga é o rolamento. Concluindo, o aumento da frequência de chaveamento melhora algumas características, porém não é uma solução simples de se tomar.

As características de torque para motor e máquinas são representadas na relação entre velocidade e torque ou potência de saída. As características de torque para carga ou máquina podem ser divididas em quatro grupos (Figura 9), LOBOSCO (1988).

FIGURA 9. CARACTERÍSTICAS DE CARGAS TÍPICAS



Onde:

T: Torque

P: Potência

N: Velocidade angular

V: Velocidade de deslocamento

K: Uma constante

O grupo (4) compreende a máquinas que operam por força centrífugas assim como; bombas e ventiladores. As razões que distinguem as características são as seguintes:

- Quando a velocidade de bombas e ventiladores aumenta, a potência aumenta com o cubo da velocidade ( $P = n^3$ ).
- regime normal de trabalho de bombas e ventiladores se encontra no intervalo de velocidade de 50 a 90%. A razão da carga aumenta com o quadrado da velocidade.

Estes dois fatores são mostrados nas características de torque de um motor controlado por um inversor de frequência. Se o torque de carga é constante, o motor deve fornecer um torque maior do que a carga, este excesso de torque é utilizado para aceleração. O torque de sobrecarga de 60% é fornecido pelo inversor por pouco tempo e é suficiente para acelerar a carga assim como partidas de torque elevado, como o caso de correias de

transporte. O torque de sobre carga também garante que o sistema seja capaz suportar aumentos súbitos de carga. Um inversor de frequência que não permita qualquer torque de sobrecarga tem que ser escolhido em função do troque aceleração ao invés do torque nominal (LOBOSCO, 1988).

## 2.12 ANÁLISE ECONÔMICA DE PROJETOS

Em termos gerais, projeto é um estudo que avalia aspectos técnicos, econômicos, financeiros e sociais das conseqüências da tomada de uma determinada decisão. Estas decisões envolvem a utilização de recursos que são despendidos para criar benefícios por um determinado período de tempo (LEONE, 1989). Os projetos podem ser de dois tipos: Implantação e Incremental. Os de implantação consistem na análise de uma atividade nova na empresa, enquanto um projeto incremental se refere a mudanças em alguma atividade existente (PEREZ JÚNIOR *et al*, 1997). Essa diferença é fundamental na análise de projetos, tendo enorme influência na formação dos fluxos de caixa.

Os fluxos de caixa são os valores monetários que refletem as entradas e saídas dos recursos e produtos por unidade de tempo e que formam uma proposta de investimento. O fluxo é composto por dois itens monetários principais: entrada e saída. Entradas são os recursos da comercialização da produção. As saídas têm origem nos orçamentos e costumam demandar uma grande quantidade de informações de naturezas diversas, o que explica o caráter multidisciplinar dos projetos (LEONE, 1989). Saldo é a diferença entre as receitas (ou entradas) e as saídas. Por regra geral, todo projeto de investimento apresenta saldo negativo ao menos no primeiro ano (o ano de instalação), o que significa que as despesas de investimento e operacionais que houverem superam as receitas. Se o saldo fosse positivo no primeiro ano, o investimento se pagaria no mesmo período, o que é muito difícil de ocorrer quando se trata de investimento que objetiva atender uma empresa no médio e longo prazo (IUDÍCIBUS, 1986).

Diversos métodos são indicados para a avaliação econômica de projetos. Esses métodos podem ser divididos em duas categorias, segundo a consideração ou não da dimensão tempo sobre os valores monetários (KASSAI *et al*, 2000).

Dois desses métodos não levam em conta esta dimensão, enquanto outros três o fazem. Os dois primeiros, Período de Recuperação do Capital (*Pay-back*) e Retorno Sobre o

Investimento não consideram a dimensão tempo. Já o Valor Líquido Presente (VLP), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Relação Benefício/Custo (B/C) pertencem à segunda categoria (KASSAI *et al*, 2000).

Todos os métodos têm por objetivo indicar se o projeto é viável ou não e permitir selecionar um (1) entre outros.

O método denominado Período de Recuperação do Capital (*Pay-back*) visa determinar o número de períodos (anos, meses, etc) necessários para que a empresa recupere o capital investido no projeto, podendo também ser calculado levando-se em consideração a taxa mínima de atratividade do mercado (HIRSCHFELD, 1998). Sendo  $L_0$  o investimento inicial,  $L_t$  o fluxo anual do projeto e  $N$  o horizonte do projeto, o Período de Recuperação do Capital será dado por:

$$Z = \sum_{t=0}^n L_t = 0$$

Equação 17

$t = 0, 1, 2, \dots, N$  onde  $N \geq n$

Em geral,  $L_0 < 0$  e  $L_t > 0$  para  $t \geq 1$

O método denominado Valor Líquido Presente (VLP) estima o valor atual, de um fluxo de caixa, usando para isso uma taxa mínima de atratividade do capital. O VLP é compreendido como a quantia equivalente, na data zero, de um fluxo financeiro, descontando-se a taxa de juros determinada pelo mercado (HIRSCHFELD, 1998). A atividade é desejável se o VLP for maior ou igual a zero, pagando-se a taxa de juros determinada para o uso alternativo daquele dinheiro. Sendo  $R_n$  a receita do período  $n$ ,  $C_n$  o custo do período  $n$  e  $i$  a taxa mínima de atratividade do capital no mercado, o modelo geral é:

$$VLP = \sum_{t=0}^n \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n}$$

Equação 18

Já o método denominado Taxa Interno de Retorno (TIR) é uma taxa de desconto para a qual o VLP dos benefícios é igual ao VLP dos custos. Ela representa a eficiência marginal do capital e corresponde à taxa de lucratividade esperada dos projetos de investimento (HIRSCHFELD, 1998). Esta variação é consequência do volume de investimentos iniciais e do fluxo de retornos de cada projeto. A regra de decisão indica que somente se fará o investimento se a TIR for maior que a taxa de juros no mercado financeiro. A escolha de um investimento deve, necessariamente, recair sobre aquele que tiver a maior TIR. Quanto maior for a TIR, mais desejável é o investimento. Temos então que o valor da TIR de um investimento pode ser calculado, obtendo-se a taxa de juros que faz com que o VLP seja igual a zero. Desta forma, o modelo para sua obtenção pode ser assim definido:

$$\text{VLP} = \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i)^t} = 0$$

Equação 19

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 COLETA DO MATERIAL

Em função da utilização em larga escala da madeira do gênero *Pinus* pela indústria madeireira na região sul, optou-se pela utilização de *Pinus taeda* L. O material foi coletado em povoamento homogêneo, na Estação Experimental do Cangüiri da Universidade Federal do Paraná - UFPR, localizado no município de Pinhais/PR. Seis árvores de 30 anos de idade foram derrubadas e serradas na Estação Experimental. A espécie foi devidamente catalogada no Herbário do Departamento de Ciências Florestais, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná sob o número 9607. A metodologia adotada considerou tábuas pareadas no processo de avaliação.

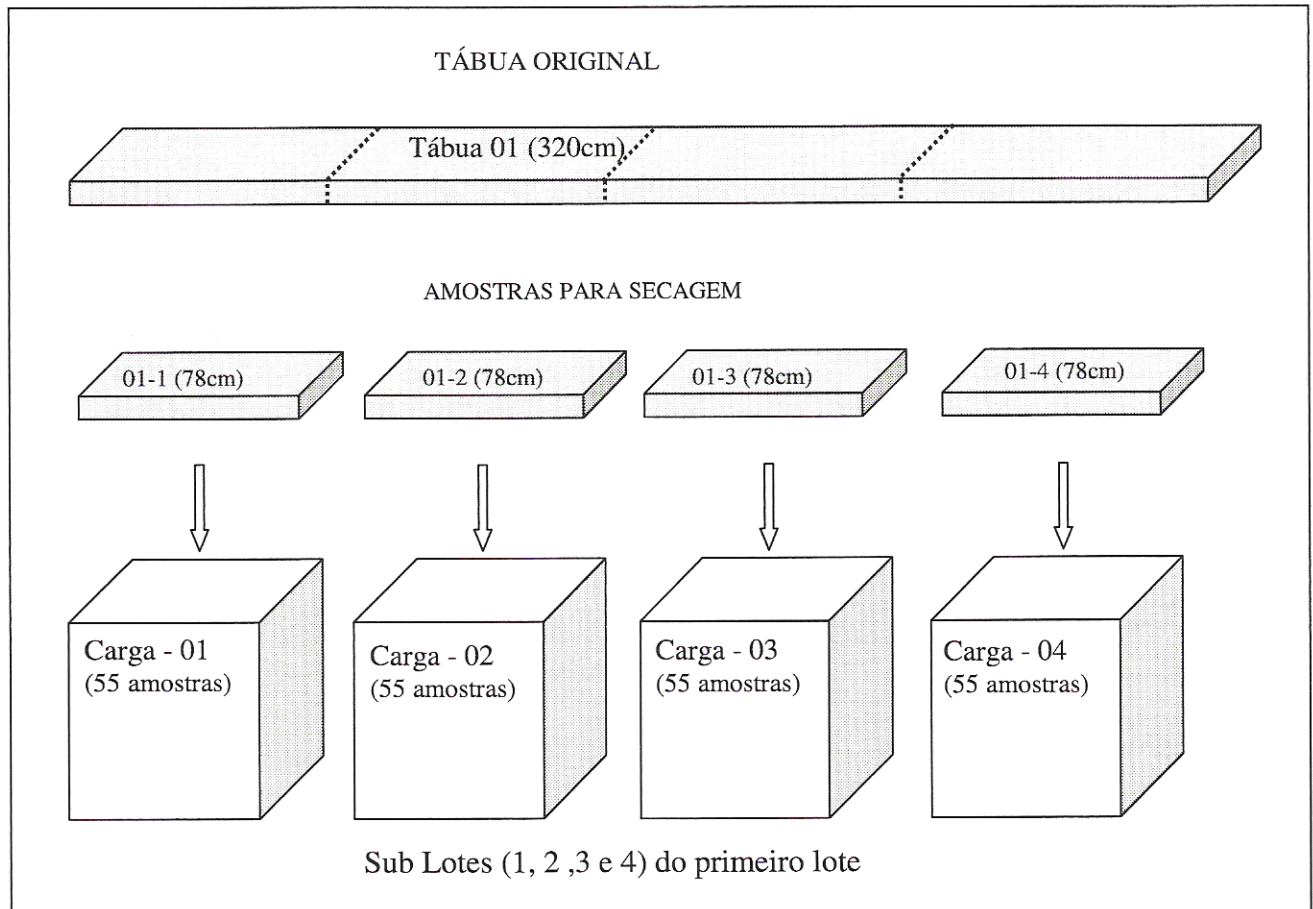
Foram utilizadas 110 tábuas, separadas em dois lotes de 55 tábuas. Cada lote correspondeu a uma velocidade do ar estudada (2 e 4m/s). As tábuas do primeiro lote foram serradas e numeradas nas dimensões nominais de 320cm de comprimento, 18cm de largura e 3,6cm de espessura, totalizando aproximadamente 2,3m<sup>3</sup> de madeira serrada.

Utilizando-se uma serra circular destopadeira tipo pêndulo, as tábuas foram serradas em 4 amostras de 78cm de comprimento, e agrupadas aleatoriamente em 4 sub lotes (1, 2, 3 e 4). Na Figura 11, pode-se observar esquematicamente a retirada das amostras a partir das tábuas e a formação dos sub lotes do primeiro lote. Cada sub lote corresponde a uma carga utilizada na secagem.

O segundo lote de tábuas formou os 4 sub lotes (5, 6, 7 e 8) seguindo a mesma metodologia, serrados somente após a secagem dos 4 sub lotes do primeiro lote. Os sub lotes contendo 55 tábuas (amostras) com 78cm do primeiro lote, foram embalados em plástico resistente e armazenados em uma câmara fria à  $5 \pm 1^{\circ}\text{C}$ , seguindo metodologia adotada por STEINHAGEN (1974), MILOTA & TSCHERNITZ (1990) e SIMPSON (1997), afim de minimizar a perda de umidade das peças e o ataque por fungos. Uma das cargas foi encaminhada para o Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, para iniciar a preparação da madeira para secagem.



FIGURA 10. RETIRADA DAS AMOSTRAS DAS TÁBUAS E FORMAÇÃO DAS CARGAS DO PRIMEIRO LOTE DE (4M/S)



### 3.2 PREPARAÇÃO DO MATERIAL PARA A SECAGEM

No Laboratório de Usinagem as tábuas foram novamente destopadas com 74,5cm de comprimento. No momento do destopo foi retirada uma pequena amostra de cada peça para determinação do teor de umidade inicial da carga.

#### 3.2.1 Teor de umidade inicial

As amostras foram pesadas obtendo-se o peso úmido em balança digital, com capacidade de 310g e precisão de 0,001g e colocadas em uma estufa de laboratório sem ventilação forçada a  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$  até peso constante. Após atingirem o peso constante foram

obtidos os pesos secos das amostras para cálculo do teor de umidade inicial da carga, através fórmula a seguir:

$$U = \left( \frac{PU - PS}{PS} \right) \times 100 \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

U = Teor de umidade (%);

PU = Peso úmido da amostra (g);

PS = Peso seco da amostra (g).

### 3.2.2 Massa específica aparente verde

As peças após serem destopadas, foram identificadas e pesadas em balança eletromecânica, com capacidade de 6000g  $\pm$  0,5g. Foram medidas a largura de cada peça duas vezes, próximo aos extremos com uma trena de 2,0m  $\pm$  0,1mm, e a espessura duas vezes em diagonal, próximo aos extremos utilizando o paquímetro de 15cm  $\pm$  0,05mm. Os locais onde se realizaram as medidas foram marcados com lápis cópia, para que as medidas fossem realizadas sempre na mesma posição. Com obtenção do volume e do peso inicial foi calculada a massa específica verde de cada tábua (g/cm<sup>3</sup>) através da seguinte fórmula.

$$MEap = \frac{M_U}{V_U} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

MEap = Massa Específica aparente (g/cm<sup>3</sup>);

M<sub>U</sub> = Massa a um determinado teor de umidade (g);

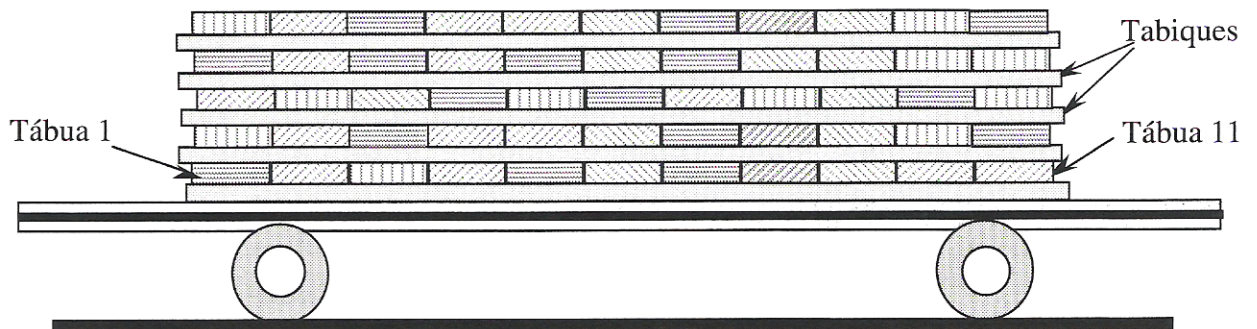
V<sub>U</sub> = Volume a um determinado teor de umidade (cm<sup>3</sup>).

Iniciou-se o empilhamento das tábuas no carro transportador da câmara de secagem. Na primeira fila foram empilhadas as tábuas de número 01 até a tábua número 11,

prossequindo desta forma até a tábua número 55. As tábuas foram colocadas no carro perpendicularmente ao fluxo de ar.

Cada fila foi composta por 11 tábuas resultando em uma pilha de aproximadamente 2,0m a largura (11 x 18). No total foram empilhadas 55 tábuas em 5 filas. No empilhamento das tábuas foram utilizados tabiques separadores com 28mm de altura e 25mm de largura. As tábuas foram empilhadas na região central do carro (Figura 12).

FIGURA 11. FORMAÇÃO DA CARGA NO CARRO TRANSPORTADOR



### 3.3 CÂMARA DE SECAGEM DE MADEIRA

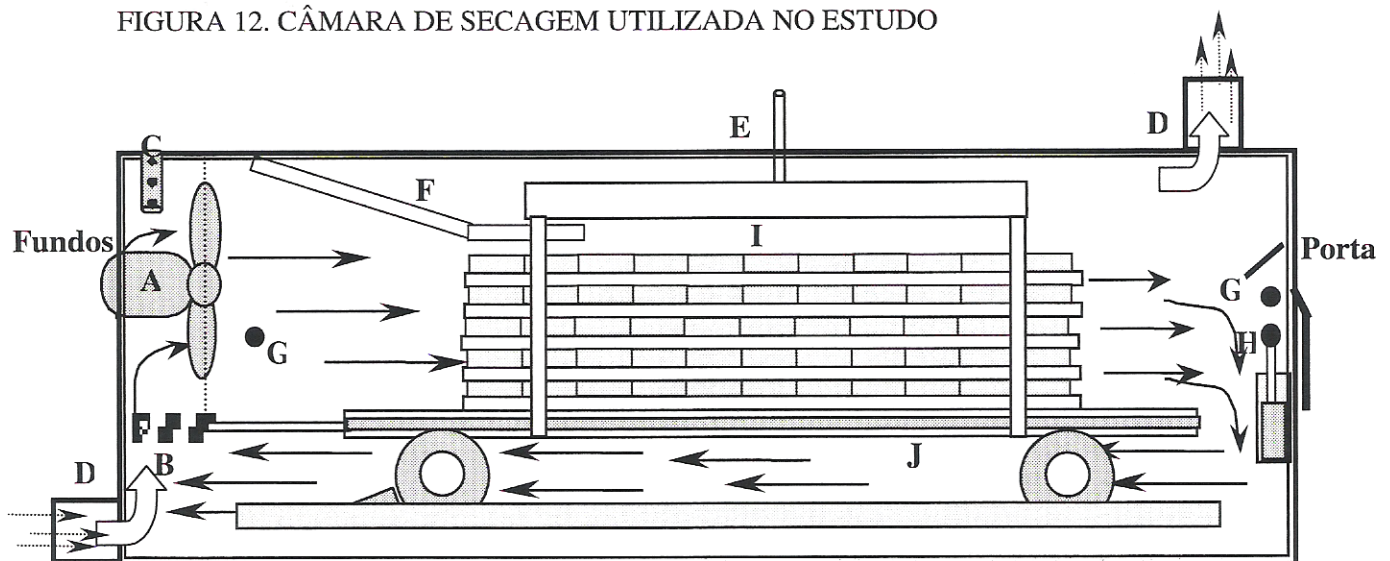
No estudo foi utilizada uma câmara de secagem semi-industrial metálica, com dimensão nominal útil de 0,80 x 0,80 x 4,0m de altura, largura e comprimento respectivamente. A câmara está alocada no Laboratório de Secagem de Madeiras do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, com capacidade nominal de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada e gradeada com 25mm de espessura.

Pode-se observar na Figura 13, que a câmara possui sistema elétrico para aquecimento, produção de vapor e controle das aberturas de ar e um ventilador do tipo axial com produção de 3600m<sup>3</sup>/h de ar, segundo especificação do fabricante. Apresenta sensores eletro-eletrônicos do tipo PT100 para medição das temperaturas do bulbo seco (TBS) e de bulbo úmido (TBU) formando o psicrômetro para controle da umidade relativa na câmara. Foram instalados dois TBS, um na porta e um nos fundos da câmara. A câmara possui

condições de obter do teor de umidade da madeira durante a secagem pelos métodos de pesagem (gravimétrico) e elétrico (resistivo).

O gerenciamento de todo o processo de secagem foi realizado por um controlador automatizado disponível no mercado com *software* específico adaptado para levantamento das variáveis necessárias no estudo.

FIGURA 12. CÂMARA DE SECAGEM UTILIZADA NO ESTUDO



Legenda:

A = motor do ventilador (1,5CV);

B = Aquecimento (resistência elétrica);

C = Injeção de vapor saturado;

D = Entrada e saída de ar;

E = Sistema de suspensão da carga mais carrinho (balança);

F = Sistema de deflexão do ar (redução da área de passagem do ar);

G = Termômetros do tipo PT 100 (TBS);

H = Termômetros do tipo PT 100 (TBU);

I = Madeira gradeada;

J = Carro transportador da carga;

→ = Fluxo de ar.

- Descrição detalhada dos componentes da câmara

A câmara apresenta parede dupla de alumínio com estrutura metálica em aço e isolamento térmico em lã de vidro com 5,0cm de espessura. O comando elétrico central tem ligação trifásica, necessitando de corrente nominal de 70A, distribuídos para os sistemas: de aquecimento, circulação do ar (ventilador), injeção de vapor saturado e sistema de ventilação (entrada e saída de ar). Todos os sistemas elétricos são comandados por *relés* magnéticos (contactores). A seguir serão apresentados detalhadamente os sistemas mencionados.

#### 1) Sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento é composto por três resistências blindadas, com as seguintes características:

- tensão nominal (3 X 220V);
- corrente nominal (24A);
- ligadas em triângulo;
- potência de 9kW (46000 BTU).

#### 2) Sistema de circulação do ar

O sistema de circulação do ar é composto por um motor e um ventilador, com as seguintes características:

- Motor
  - motor 4 pólos;
  - potência nominal (2,0HP – 1,5kW);
  - tensão nominal (220V);
  - corrente nominal (7,5A);
  - frequência (60Hz);
  - rotação nominal (1750rpm);
  - Fator de Potência ( $\text{Cos}\phi$  0,72).

- ventilador
  - Vazão de 3600m<sup>3</sup>/h
  - Hélice de alumínio fundido;
  - acionamento direto do eixo;
  - diâmetro 60cm (08 pás);

### 3) Sistema de vaporização

O sistema de vaporização é composto por uma caldeira elétrica com as seguintes características:

- tensão nominal (3 x 220V);
- corrente nominal (16A);
- frequência (60HZ);
- potência de 6kW.

### 4) Sistema de ventilação

O sistema de ventilação é composto de um comando elétrico para abertura e fechamento das válvulas, apresenta as seguintes características:

- tensão nominal (220V);
- frequência (50HZ).

## 3.4 SISTEMAS DE CONTROLE E ARMAZENAMENTO DOS DADOS

### 3.4.1 Gerenciamento do processo de secagem

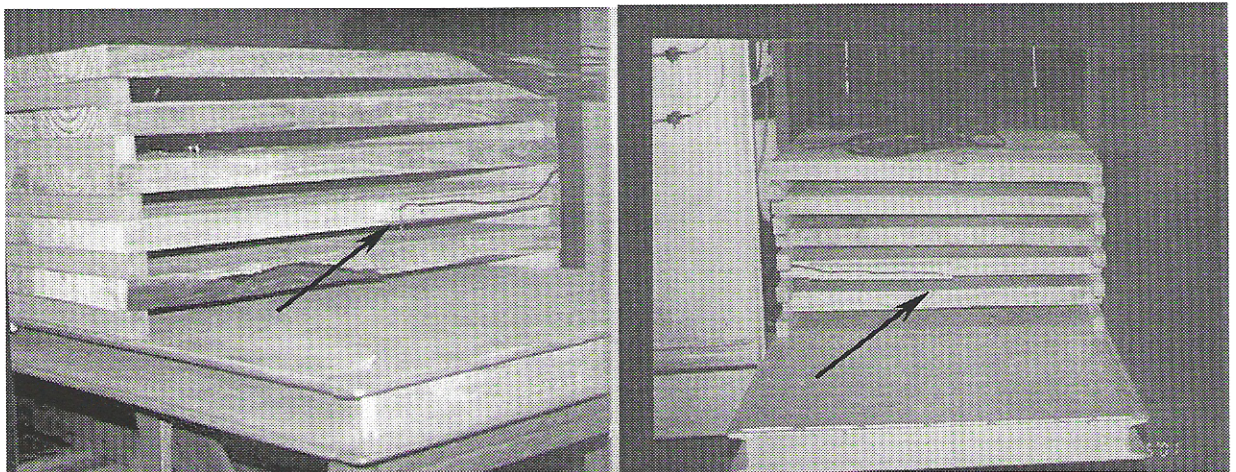
Para controle do processo de secagem utilizou-se um sistema comercial automatizado de gerenciamento de secagem de madeira (*MARRARI*), que apresentava 08 pontos de medição de umidade pelo método resistivo, ligado a um microcomputador *pentium-233 MMX*, com *software* gráfico para *Windows* (MR 530), especificamente desenvolvido para

controle, coleta e armazenamento dos dados.

Com relação a coleta dos dados referente a queda de temperatura na passagem pela pilha ( $\Delta T$ ), empregou-se um sistema de aquisição de sinais (*MILINK – LYNX* Tecnologia Eletrônica). A coleta e armazenamento dos dados se realizaram por meio de um microcomputador modelo 486-DX2 com *software AQDADOS* para *MS-DOS* (fornecido pelo fabricante).

A medição da temperatura do ar na passagem da pilha foi obtida através de termopares. Foram utilizados dois cabos para medição, colocados um na entrada e outro na saída do ar na pilha (Figura 14), sempre entre a primeira e a segunda fila de madeira, fixados a uma distância de 25mm da pilha, seguindo a recomendação de WEGERT (1992).

FIGURA 13. TERMOPARES UTILIZADOS PARA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR NA ENTRADA E NA SAÍDA DA PILHA



a) Temperatura na entrada do ar

b) Temperatura na saída do ar

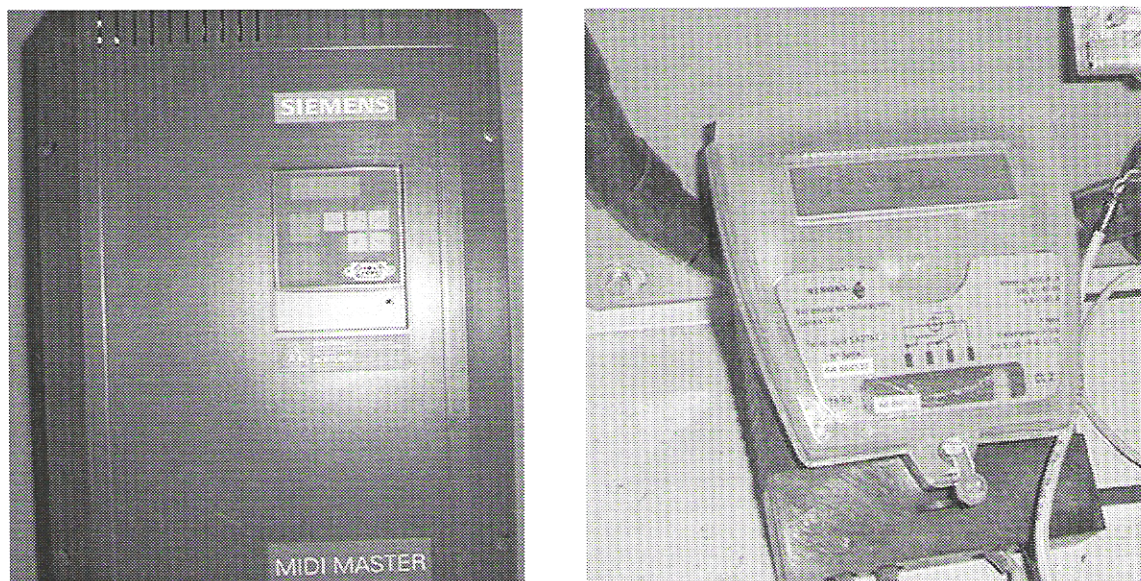
### 3.4.2 Inversor de frequência e medidor de energia

Foi utilizado um inversor de frequência (*SIEMENS – MIDIMASTER*), que possibilitou a variação da velocidade do ar, através de alteração da rotação do motor (rpm). O inversor apresenta um comando vetorial sem sensor que permite calcular as alterações necessárias na corrente de saída e na frequência, a fim de manter a velocidade desejada do motor ao longo de uma extensa faixa de condições de carga (*SIEMENS 1999*). Este equipamento foi ligado ao sistema de gerenciamento, atuando no processo simultaneamente

quando solicitado.

O consumo de energia elétrica (Wh) do motor do ventilador foi quantificado utilizando um medidor digital (SINGEL) ligado ao sistema de gerenciamento do processo, (Figura 15). O equipamento foi cedido pela Companhia Paranaense de Energia e Elétrica (COPEL).

FIGURA 14. INVERSOR DE FREQUÊNCIA E MEDIDOR DE ENERGIA UTILIZADO



a) Inversor de frequência (SIEMENS)    b) Medidor de energia elétrica digital (SINGEL)

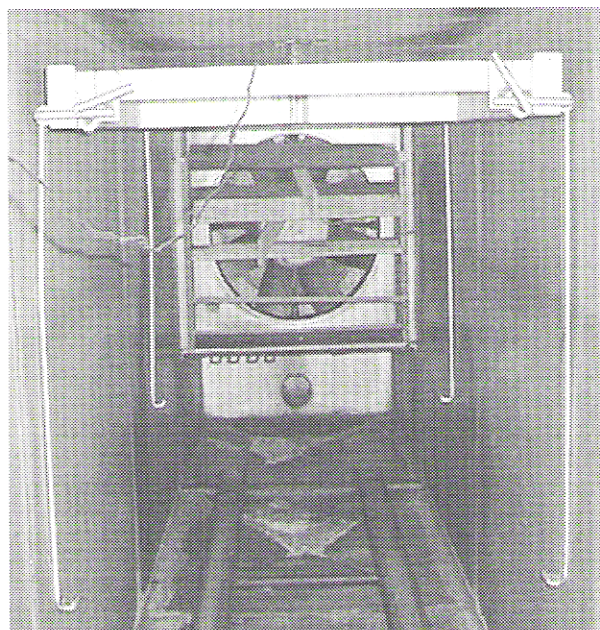
### 3.4.3 Sistema de pesagem da carga (método gravimétrico)

O equipamento (Sistema de Balança) utilizado para determinação do teor de umidade da madeira por pesagem da carga foi desenvolvido por SANTINI (1996). O peso do conjunto foi obtido utilizando-se um macaco mecânico que suspendia todo o sistema ligado a uma célula de carga (EMIC) em forma de “S”, para tração ou compressão que utilizava um transdutor do tipo “strain gauge”, com capacidade de 1000kgf (Figura 16). Para o funcionamento da célula de carga, foi desenvolvido um módulo codificador que ajustou a referência do sinal da célula de carga antes de enviá-lo para o sistema de gerenciamento do processo de secagem. O peso da carga de madeira foi coletado e armazenado de 2 em 2 minutos durante o processo secagem e transformado posteriormente em teor de umidade.

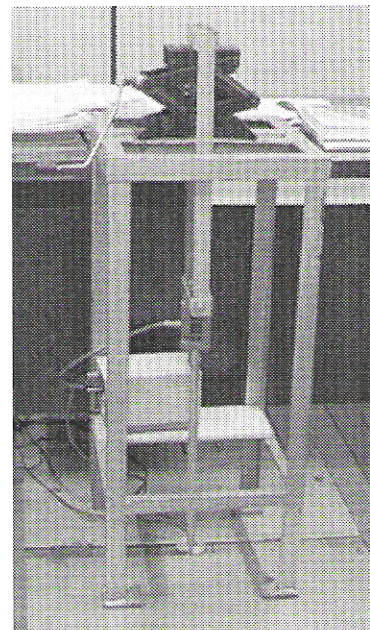


O conjunto formado pelo carro transportador, cabos sensores e separadores foram suspensos pelo sistema de pesagem para obtenção do peso inicial, sendo considerado a tara do equipamento. Em seguida suspendeu-se o conjunto mais a madeira já gradeada obtendo-se o peso inicial da carga por diferença. Este procedimento foi realizado com a câmara desligada e ligado, para verificação da influência da circulação do ar no peso da carga.

FIGURA 15. SISTEMA DE PESAGEM DA CARGA UTILIZADO PARA OBTER O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA DESENVOLVIDO POR SANTINI (1996)



a) Balança para suspender a carga

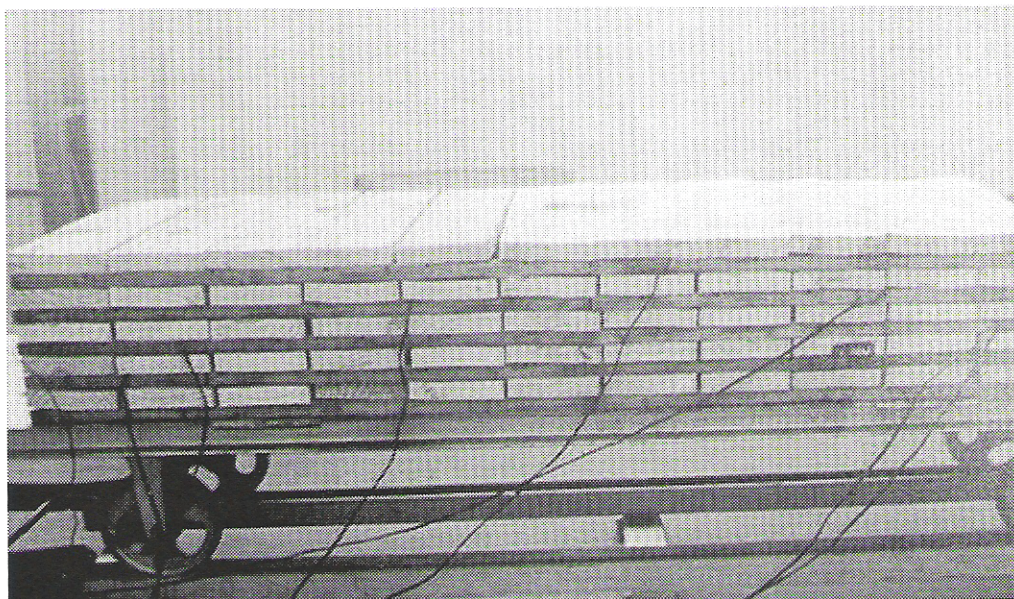


b) Célula de carga

#### 3.4.4 Sistema elétrico por cabos sensores (método resistivo)

Foram utilizados 7 cabos para acompanhamento da umidade da madeira pelo método resistivo. Os cabos foram distribuídos estrategicamente na pilha de madeira (Figura 17), procurando cobrir a variação de umidade existente na carga. Os pinos sensores foram cravados na madeira à 1/3 da espessura, colocados perpendicularmente à Grã da madeira e distantes entre si 25mm. Foi utilizado um gabarito para fixar os pinos sempre na mesma distância e os pinos foram revisados entre uma carga e outra quanto sua condição de uso. Verificando-se a fixação dos sensores nos cabos (sua ligação), limpeza e se os cabos algum apresentavam rompimento.

FIGURA 16. CABOS SENSORES DISTRIBUÍDOS NA CARGA DE MADEIRA



### 3.5 VARIÁVEIS CONTROLADAS NO PROCESSO

#### 3.5.1 Programas de secagem

A madeira de *Pinus* é utilizada em vários mercados, principalmente na fabricação de móveis e de *Clear Blocks* para molduras e esquadrias em geral. Por esta razão, foram utilizados dois programas do sistema convencional, um mais suave e um mais severo procurando abranger os dois mercados respectivamente. Os programas utilizaram temperaturas de 70 e 90°C, baseadas em SANTINI (1996) e apresentaram 08 fases durante a secagem (Tabelas 4 e 5).

A umidade relativa do ar e a umidade de equilíbrio apresentados nos programas foram obtidas de BRAMHALL & WELLWOOD (1976). Para o cálculo do potencial de secagem (Ps), utilizou-se o valor intermediário de cada fase, sendo calculado somente a partir da segunda fase da secagem. O cálculo do potencial de secagem foi realizado através da fórmula descrita a seguir:

$$Ps = \left( \frac{U_{\text{Atual}}}{UE} \right) \times 100 \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

Ps = Potencial de secagem;

$U_{\text{Atual}}$  = Teor de umidade atual (%);

UE = Umidade de equilíbrio (%).

TABELA 4. PROGRAMA DE SECAGEM PARA TEMPERATURA DE 70°C

FASE	Teor de umidade (%)	TBS (°C)	TBU (°C)	UR (%)	UE (%)	Ps
AQC.	5 horas	70	70	100	22,0	-
S E C A G E M	1 Verde – 50	70	64	74	11,0	-
	2 50 – 40	70	62	67	9,4	4,8
	3 40 – 35	70	59	59	8,0	4,7
	4 35 – 30	70	57	53	7,1	4,6
	5 30 – 25	70	54	45	6,1	4,5
	6 25 – 20	70	52	40	5,5	4,1
	7 20 – 15	70	51	37	5,2	3,4
	8 15 – 10	70	50	35	5,0	2,5
ACON.	6 horas	70	63	73	10,5	1

Onde:

AQC. = Aquecimento de 5 horas;

TBS = Termômetro de bulbo seco (°C);

TBU = Termômetro de bulbo úmido (°C);

UR = Umidade relativa do ar (%);

UE = Umidade de equilíbrio (%);

Ps = Potencial de secagem;

ACON. = Acondicionamento de 6 horas.

TABELA 5. PROGRAMA DE SECAGEM PARA TEMPERATURA DE 90°C

FASE	Teor de Umidade (%)	TBS (°C)	TBU (°C)	UR (%)	UE (%)	Ps
AQC.	5 horas	70	70	100	22,0	-
S E C A G E M	1 Verde - 50	90	82	72	9,0	-
	2 50 – 40	90	80	67	7,9	5,7
	3 40 – 35	90	77	59	6,7	5,6
	4 35 – 30	90	75	54	6,0	5,4
	5 30 – 25	90	73	49	5,5	5,0
	6 25 – 20	90	71	45	5,0	4,5
	7 20 – 15	90	69	41	4,5	3,9
	8 15 – 10	90	68	39	4,4	2,8
ACON.	6 horas	90	84	74	10,5	1

Onde:

AQC. = Aquecimento de 5 horas;

TBS = Termômetro de bulbo seco (°C);

TBU = Termômetro de bulbo úmido (°C);

UR = Umidade relativa do ar (%);

UE = Umidade de equilíbrio (%);

Ps = Potencial de secagem;

ACON. = Acondicionamento de 6 horas.

### 3.5.2 Velocidade de circulação do ar

Para cada programa de secagem foram utilizadas duas velocidades do ar (2,0 e 4,0m/s). Para obter-se tais velocidades foi variada a área de passagem do ar na câmara mantendo-se constante a vazão. Na velocidade de 4,0m/s obteve-se uma área de passagem do ar de 0,20m<sup>2</sup> e para a velocidade de 2,0m/s obteve-se uma área de passagem do ar de 0,37m<sup>2</sup>. Foram tomadas medidas de velocidade do ar na saída da pilha de madeira entre os espaços

deixados pelas filas de madeira após o perfeito gradeamento das mesmas, antecedendo cada secagem. Mediu-se a velocidade do ar com um termo anemômetro digital portátil microprocessado de fio quente com precisão de 0,1m/s. A medição ocorreu na saída da pilha. Em função da medição da velocidade do ar na saída da pilha e da medição da área de passagem calculou-se a vazão de ar aplicando a seguinte fórmula:

$$F = V_e * A * 3600 \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

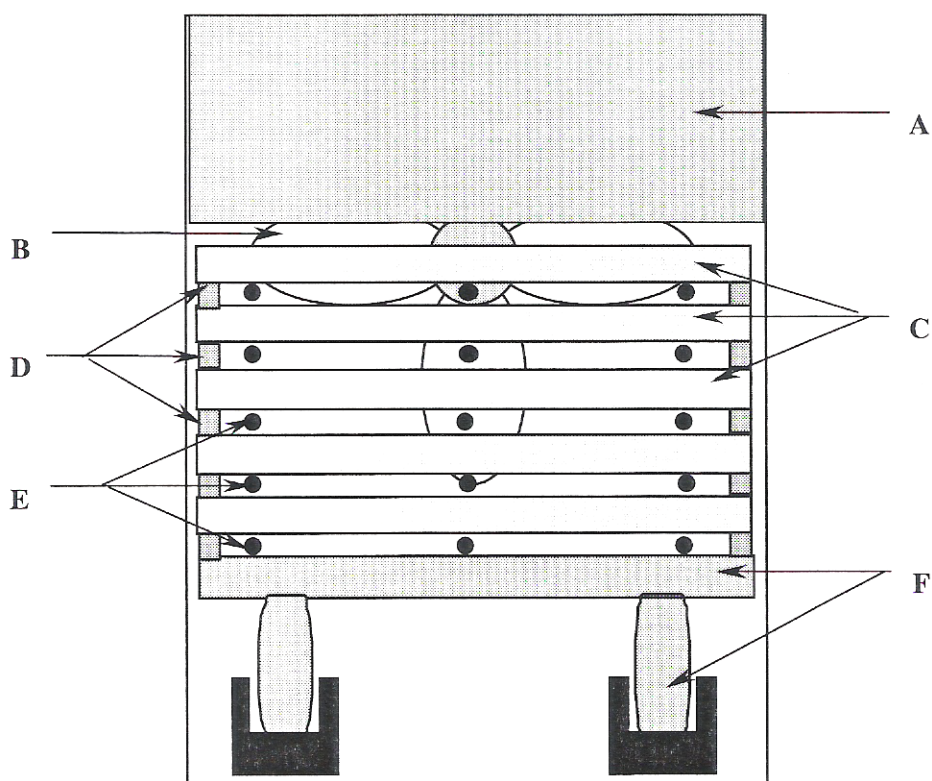
F = Vazão de ar calculada em cada programa, (m<sup>3</sup>/h);

V<sub>e</sub> = Velocidade do ar medida na saída da pilha para cada programa, (m/s);

A = Área de passagem do ar medida, (m<sup>2</sup>).

Para avaliação da velocidade de circulação do ar na câmara de secagem utilizou-se a sistemática apresentada na Figura 18. As medições de velocidade do ar foram realizadas antes de iniciar cada processo de secagem.

FIGURA 17. VISTA FRONTAL DA CÂMARA DE SECAGEM MOSTRANDO OS PONTOS DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR



Onde:

A = Placa defletora;

B = Ventilador;

C = Madeira (amostras);

D = Tabiques separadores;

E = Pontos de medição da velocidade do ar;

F = Carro transportador.

### **3.5.3 Consumo de energia elétrica em função da rotação do motor**

Para avaliação da câmara de secagem mediou-se o consumo de energia elétrica do motor do ventilador da câmara de secagem variando-se a sua rotação de 5 em 5%, sendo medido simultaneamente o consumo de energia elétrica (Wh). Foram realizadas três (3) repetições de coleta dos dados. A variação da rotação do motor foi realizada pelo inversor de frequência o qual estava acoplado ao sistema de gerenciamento de secagem.

## **3.6 CÁLCULOS PARA USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

### **3.6.1 Vazão mínima de ar para cada fase da secagem**

Para o cálculo da vazão mínima necessária nas diferentes fases da secagem foram adaptadas as metodologias descritas por ELKMANN & BAKER (1976), KINNINMONTH (1980), VILIERRE (1966). Foram utilizadas as variáveis apresentadas nas Tabelas 6 e 7. As variáveis foram obtidas das curvas de secagem realizadas nas temperaturas de 90 e 70°C, nas velocidades do ar de 4 e 2m/s, quando não foi variada a velocidade do ar através do inversor de frequência. Na Tabela 6, os valores correspondem aos programas de 90°C e na Tabela 7, aos de 70°C.

TABELA 6. VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA O CÁLCULO DA VAZÃO MÍNIMA NAS DIFERENTES FASES DA SECAGEM DE *P. taeda* COM 36mm DE ESPESSURA NA TEMPERATURA DE 90°C

TEMPERATURA DE 90°C							
Fases da secagem	Umidade relativa do ar (nominal)	Velocidade do ar 4m/s			Velocidade do ar 2m/s		
		Tempo (h)	Massa d'água (kg)	$\Delta$ -T	Tempo (h)	Massa d'água (kg)	$\Delta$ -T
1	0,72	21	81,3	2,5	25	84,2	3,2
2	0,67	5	13,6	2,5	5	14,0	3,2
3	0,59	3	6,8	2,5	3:30'	7,0	3,2
4	0,54	3:30'	6,8	2,5	4	7,0	3,2
5	0,49	4	6,8	2,5	5	7,0	3,2
6	0,45	4:30'	6,8	2,5	6	7,0	3,2
7	0,41	6	6,8	2,5	6	7,0	3,2
8	0,39	7	6,8	2,5	7	7,0	3,2

TABELA 7. VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA O CÁLCULO DA VAZÃO MÍNIMA NAS DIFERENTES FASES DA SECAGEM DE *P. taeda* COM 36mm DE ESPESSURA NA TEMPERATURA DE 70°C

TEMPERATURA DE 70°C							
Fase da secagem	Umidade relativa do ar (nominal)	Velocidade do ar 4m/s			Velocidade do ar 2m/s		
		Tempo (h)	Massa d'água (kg)	$\Delta$ -T	Tempo (h)	Massa d'água (kg)	$\Delta$ -T
1	0,74	33	86,6	2,2	38	90,2	2,4
2	0,67	6:30'	14,5	2,2	8	15,1	2,4
3	0,59	4:30'	7,3	2,2	5	7,5	2,4
4	0,53	5	7,3	2,2	7	7,5	2,4
5	0,45	6:30'	7,3	2,2	9	7,5	2,4
6	0,40	7:30'	7,3	2	11	7,5	2,4
7	0,37	8	7,3	2,2	11	7,5	2,4
8	0,35	9	7,3	2,2	12	7,5	2,4

Onde:

$\Delta T$  = queda de temperatura através da pilha de madeira (delta T);

Tempo = tempo em horas na fase durante a secagem;

Massa d'água = massa d'água a ser removida na fase de secagem;

Umidade relativa = o valor nominal da umidade relativa foi utilizada para as duas curvas estudadas.

A umidade relativa do ar no interior da câmara de secagem, foram obtidas em função das condições de secagem empregadas nas curvas (TBS e TBU) descrita no item 3.4.1. Com a obtenção das variáveis descritas para os programas foram realizados os cálculos da vazão de ar mínima necessária em cada fase das curvas, as velocidades correspondentes para cada fase e a velocidade relativa (%), a ser empregada utilizando o inversor de frequência durante as fases dos programas.

### 3.6.2 Vazão de ar (%) cada fase da secagem

A vazão mínima de ar ( $m^3/h$ ), para cada uma das fases dos programas de secagem (Tabela 8), foi obtida em função das variáveis apresentadas nas Tabelas 6 E 7 e aplicadas integralmente no processo de secagem utilizando o inversor de frequência

TABELA 8. VAZÃO DE AR ( $m^3/h$ ) CALCULADA PARA CADA FASE DOS PROGRAMAS DE SECAGEM ESTUDADAS

Fase dos programas de secagem	VAZÃO DE AR ( $m^3/h$ )			
	70-2	70-4	90-2	90-4
1	2962	3224	3020	4345,
2	2450	2751	2474	3059,
3	1920	2033	1783	2571,
4	1236	1842	1568	2215
5	971	1429	12162	1949
6	798	1245	1056	1740
7	801	1171	1061	1311
8	736	1044	911	1126



Onde:

70-2 = temperatura de 70°C, 2m/s de velocidade do ar;

70-4 = temperatura de 70°C, 4m/s de velocidade do ar;

90-2 = temperatura de 90°C, 2m/s de velocidade do ar;

90-4 = temperatura de 90°C, 4m/s de velocidade do ar.

\*obs – esta foi à legenda utilizada para as Tabelas 8 e 9.

A vazão do ar relativa ( $V_R$ ), para cada fase do programa de secagem foi calculada da seguinte maneira:

$$V_R = \left(\frac{V_C}{V_M}\right) \times 100 \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

$V_R$  = Vazão de ar relativa para cada fase dos programas, (%);

$V_C$  = Vazão de ar mínima calculada em cada fase dos programas, (m/s);

$V_M$  = Vazão de ar medida na saída da pilha com anemômetro, (m/s).

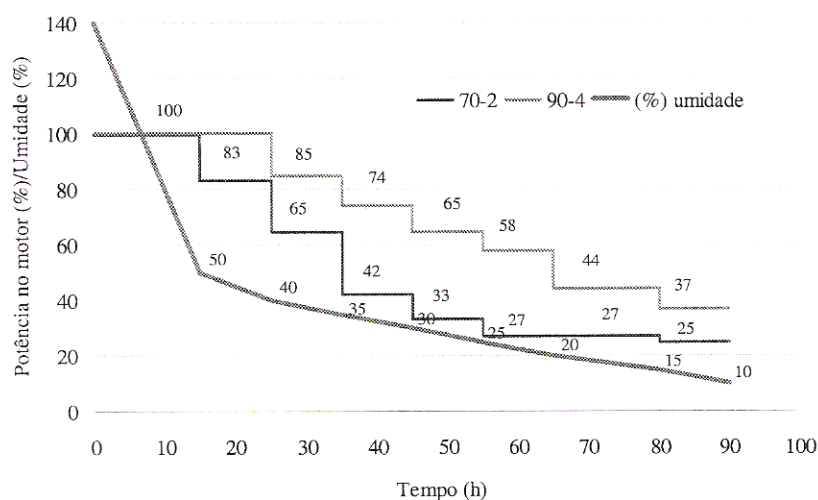
Na Tabela 9, são apresentadas as velocidades do ar (%) para cada fase da secagem nas duas velocidades nominais do ar (4 e 2m/s) estudadas e nas duas temperaturas (90 e 70°C). A velocidade do ar (%) calculada foi aplicada utilizando o inversor de frequência na secagem da madeira.

TABELA 9. VELOCIDADE DO AR (%) APLICADA NO MOTOR EM CADA FASE DAS DOS PROGRAMAS DE SECAGEM

VELOCIDADE DO AR EM CADA FASE (%)				
Fase das curvas de secagem	70-2	70-4	90-2	90-4
1	100	107	102	144
2	83	91	84	102
3	65	68	60	85
4	42	61	53	74
5	33	47	41	65
6	27	41	36	58
7	27	39	36	44
8	25	35	31	37

A vazão de ar (%) foi aplicada em forma de rampa em cada fase dos programas de secagem estudados como mostra a Figura 19. Manteve-se a vazão (%) em cada fase do programa o tempo necessário até que ocorresse a mudança de faixa de umidade no mesmo. Na Figura 19, pode-se observar a aplicação da redução da vazão de ar durante a secagem da madeira e paralelamente observa-se a curva de conteúdo de umidade padrão que controlava as mudanças de fases durante a secagem. A mudança de rotação do motor para alteração da vazão calculada foi realizada pelo inversor de frequência.

FIGURA 18. APLICAÇÃO DA VELOCIDADE (%) EM FORMA DE RAMPA NAS DIFERENTES FASES DOS PROGRAMAS DE SECAGEM



Onde:

70-2 = temperatura de 70°C, sem inversor de frequência, 2m/s de velocidade do ar;

90-4 = temperatura de 90°C, sem inversor de frequência, 4m/s de velocidade do ar;

(%) umidade = pontos de teor de umidade para mudança de fase dos programas.

### 3.7 TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem foi calculada através da relação entre dois intervalos do teor de umidade (Tabela 10) e o tempo decorrido naquele intervalo, sendo expressa em porcentagem de umidade por hora (%U/h) e quilograma de umidade por hora (kgU/h). Foram utilizados os dados coletados pelo sistema de pesagem adaptado na câmara para o cálculo da taxa de secagem. Para escolha das faixas foi utilizado como base os programas de secagem utilizados.

TABELA 10. TAXA DE SECAGEM CALCULADA EM DIFERENTES FAIXAS DE UMIDADE

FAIXA DE TEOR DE UMIDADE			
1	Verde	até	80%
2	80	até	50%
3	50	até	30%
4	30	até	20%
5	20	até	10%

### 3.8 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MADEIRA APÓS A SECAGEM

Após o resfriamento e o desligamento da câmara, retirou-se o carro transportador com a madeira deixando 24 horas em descanso para iniciar o processo de desgradeamento e avaliação da carga, descrita a seguir:

- Tomados os pesos e as medidas das tábuas secas em largura e espessura como descrito nos itens 3.2.1.1 e 3.2.1.2.
- Determinou-se o teor de umidade final, contração em largura e espessura, massa

específica aparente seca.

- Avaliou-se a coloração da madeira, mancha marrom, gradiente de umidade, tensões internas.

### 3.8.1 Massa específica aparente verde e seca

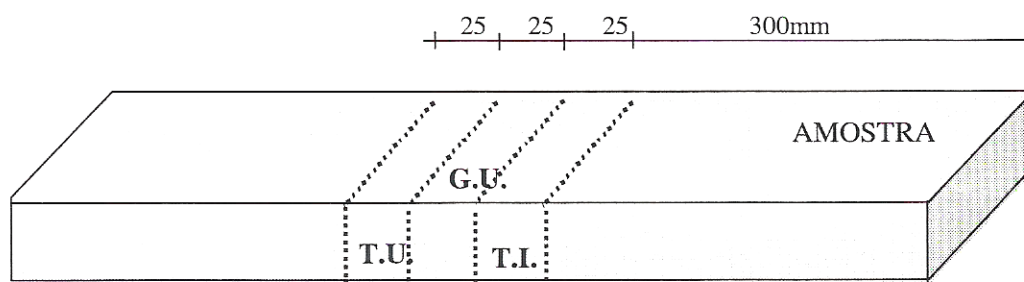
A massa específica aparente da madeira foi determinada na condição verde e após a secagem foram obtidas utilizando a descrição e calculadas como descrito no item 3.2.2.

### 3.8.2 Teor de umidade final da madeira

Foram utilizadas 20 peças de cada subote, retirou-se três amostras com 25mm de comprimento em serra de fita para determinação do teor de umidade por pesagem, gradiente de umidade e tensões internas (Figura 20).

O teor de umidade após a secagem foi obtido pesando-se as amostras para obtenção do peso inicial, a seguir as amostras foram colocadas em estufa a  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , até peso constante para serem posteriormente pesadas. Para o cálculo do teor de umidade foi utilizada a fórmula apresentada no item 3.2.1.

FIGURA 19. RETIRADA DAS AMOSTRAS PARA MEDIÇÃO DA UMIDADE, GRADIENTE DE UMIDADE E TENSÕES INTERNAS



Onde:

T.U. = Teor da umidade por pesagem;

G.U. = Gradiente de umidade;

T.I. = Tensões internas (teste de garfo).

### 3.8.3 Contração da madeira

Foram determinadas as contrações em largura e em espessura e em volume das tábuas. Para avaliação da contração volumétrica não foi considerada a contração longitudinal (comprimento das peças). O efeito da secagem na contração da madeira considerou a madeira de verde até o teor de umidade final desejado (10%).

#### 3.8.3.1 Contração em largura

A contração em largura das peças de madeira após a secagem foi obtida utilizando a fórmula a seguir:

$$C_{\text{LARG}} = \left( \frac{D_{\text{VL}} - D_{\text{SL}}}{D_{\text{VL}}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

$C_{\text{LARG}}$  = Contração em largura, (%);

$D_{\text{VL}}$  = Dimensão verde em largura, (mm);

$D_{\text{SL}}$  = Dimensão seca em largura (10%), (mm).

#### 3.8.3.2 Contração em espessura

A contração em espessura das peças de madeira após a secagem foi obtida utilizando a fórmula a seguir:

$$C_{\text{ESP}} = \left( \frac{D_{\text{VE}} - D_{\text{SE}}}{D_{\text{VE}}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

- $C_{ESP}$  = Contração em espessura, (%);  
 $D_{VE}$  = Dimensão verde em espessura, (mm);  
 $D_{SE}$  = Dimensão seca a 10% de umidade em espessura (mm).

### 3.8.4 Efeito da secagem na coloração e da mancha marrom da madeira

#### 3.8.4.1 Coloração da madeira

A coloração das tábuas foi avaliada após a secagem, utilizando a norma de classificação visual recomendado por MUNSELL (1968). Com a classificação visual buscou-se verificar a influência da temperatura, da velocidade do ar e da variação da velocidade através do uso do inversor de frequência na coloração original da madeira após a secagem. Foi realizada após a classificação o aplainamento das peças de 2mm, para verificação se houve mudança na coloração original da madeira.

#### 3.8.4.2 Mancha marrom

A análise da presença ou ausência da mancha marrom foi feita visualmente, realizada após o aplainamento das peças retirando-se somente 1mm da espessura. Foram utilizadas para avaliação 12 peças de cada carga. Desta forma pode-se verificar se a influência da variáveis utilizadas na secagem afetaram na formação da mancha marrom.

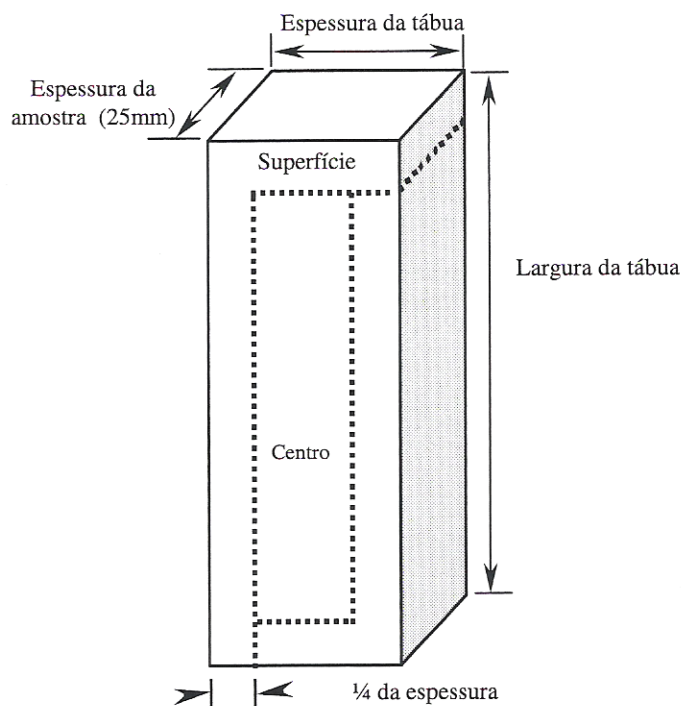
### 3.8.5 Distribuição da umidade e das tensões internas

#### 3.8.5.1 Gradiente de umidade

Para avaliação do gradiente de umidade foram utilizadas 20 amostras de cada lote. As amostras foram obtidas seguindo a metodologia anteriormente descrita (Figura 21). A

medição para determinar o gradiente de umidade neste estudo seguiu recomendação de SIMPSON (1991).

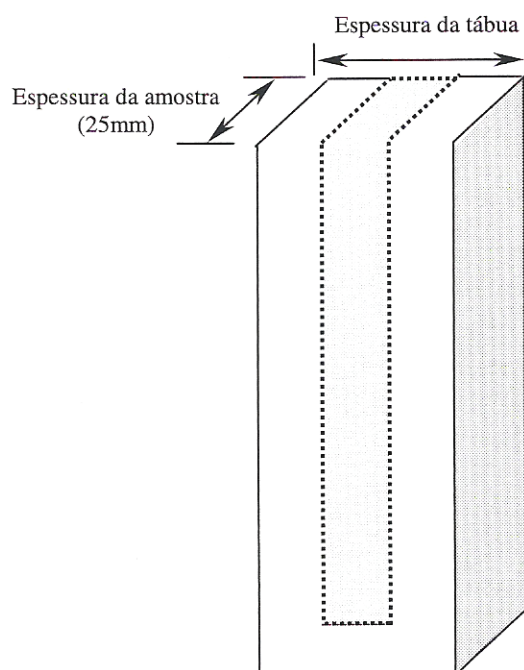
FIGURA 20. METODOLOGIA DE CORTE PARA MEDIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DO CENTRO E DA SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS ANALISADAS ADAPATADA DE SIMPSON (1991)



### 3.8.5.2 Tensões internas

Para detectar as tensões internas após a secagem foi utilizado o “teste de garfo”, seguindo metodologia adotada por SIMPSON (1991). Foi utilizada uma amostra com 25mm de largura pela espessura da tábua. O teste de garfo serviu para avaliar o efeito do acondicionamento durante as secagens e a influência do inversor de frequência na secagem da madeira. As amostras foram produzidas em serra de fita do Laboratório de Usinagem da Madeira, foram serrados 3 dentes com mesma espessura, sendo retirado com formão estreito o dente central das amostras para avaliação visual, como mostra a Figura 22.

FIGURA 21. TESTE DE GARFO UTILIZADO PARA AVALIAR AS TENSÕES INTERNAS



### 3.9 INVERSOR DE FREQUÊNCIA E SEUS IMPACTOS NA SECAGEM DA MADEIRA

#### 3.9.1 Influência do inversor de frequência no consumo de energia elétrica

Foi medido o consumo de energia elétrica (Wh) nos programas de secagem, que não variaram a velocidade do ar e nos programas que variaram a velocidade, através do inversor de frequência. Para medição do consumo de energia na circulação do ar utilizou-se aparelho digital descrito no item 3.3.2 .

Para avaliação do impacto do inversor de frequência no consumo de energia elétrica na secagem da madeira utilizou-se a seguinte fórmula:

$$EEC = 100 - \left[ \left( \frac{CEE_{\text{COM VARIÇÃO}}}{CEE_{\text{SEM VARIÇÃO}}} \right) \times 100 \right] \quad \text{Equação 27}$$



Onde:

EEC = Energia Elétrica Consumida (%);

CEE<sub>COM VARIAÇÃO</sub> = Consumo de energia elétrica com uso do inversor de frequência, (Wh);

CEE<sub>SEM VARIAÇÃO</sub> = Consumo de energia elétrica sem uso do inversor de frequência (Wh).

O consumo de energia elétrica (Kwh), foi calculada através da média entre dois intervalos do teor de umidade como na taxa de secagem (Tabela 10). Foram utilizados os dados coletados através do sistema automático de controle para realização dos cálculos.

### 3.9.2 Modelo matemático para estimar a economia de energia elétrica

A economia de energia elétrica proporcionada pelo uso do inversor de frequência na secagem da madeira foi estimada utilizando-se de uma equação resultante da diferença entre o modelo que expressa o consumo de energia sem o uso do inversor de frequência e o tempo ( $Wh = f(T)$ ) e o modelo que expressa o consumo de energia com uso do inversor e o tempo ( $Wh_{CV} = f(T)$ ).

### 3.10 ANÁLISE DO INVESTIMENTO ADICIONAL

Para analisar o efeito do inversor de frequência nos custos de secagem, empregou-se método conhecido como Período de Recuperação do Capital (*Pay Back*), na sua forma simples e levando-se em consideração a remuneração do capital no tempo. Considerou-se como investimento o preço do inversor de frequência e como receita o valor monetário da economia de energia obtida. Foi considerado viável o programa que apresentou Período de Recuperação do Capital menor que a vida útil do inversor.

Para complementação da análise foi também avaliada a viabilidade econômica do uso do inversor utilizando-se os métodos denominados Valor Líquido Presente (VLP) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). A taxa de remuneração do capital empregada (taxa de Juros)

foi de 12% ao ano. Foi considerado viável o programa que apresentou o  $VLP \geq 0$  e  $TIR \geq 12\%$

Foi realizada uma simulação de uma condição hipotética, do efeito do inversor de frequência no custo de energia elétrica de uma indústria. As condições adotadas para o cálculo foram as seguintes:

Câmara para secagem de *Pinus* spp, com capacidade para 100m<sup>3</sup> para madeira de uma polegada de espessura, com ventilação superior, instalada em prédio de alvenaria, com equipamentos internos em aço carbono, sendo seu carregamento por vagonetes, com teto intermediário de alumínio, (Tabela 11). Considerou-se 680h/mês, efetivas trabalhadas.

TABELA 11. CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA

MEDIDAS	ÚTEIS (PILHA DE MADEIRA)	EXTERNAS
Comprimento	13000mm	13500mm
Largura	2 x 2400	7300mm
Altura	3500mm	5550mm
CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA		
Capacidade	100m <sup>3</sup>	
Potencia instalada	60CV (12 x 5CV)	
Consumo médio de vapor	120 kg/h	
Vida Útil	15 anos	
Depreciação	10% ao mês	

O inversor de frequência utilizado na simulação é do tipo MIDI-MASTER VECTOR com as seguintes características (Tabela 12):

TABELA 12. CARACTERÍSTICAS DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

CARACTERÍSTICAS	ÚTEIS (PILHA DE MADEIRA)
Potencia nominal	60CV
Corrente trifásica	380V
Vida útil estimada	10 anos

Valores monetários considerados:

Preço do Inversor de frequência = R\$ 22843,43 (junto à SIEMENS)

Preço para o mês de Janeiro de 2001: = R\$ 0,07647kW O preço da energia elétrica para indústria, foi obtido junto a Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL).

Preço do Dólar comercial 12/01/02 = R\$ 2,402

### 3.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A Análise Estatística foi efetuada utilizando-se da Estatística Descritiva, Análise de Variância e Análise de Regressão.

As variáveis referentes à qualidade da madeira foram analisadas estatisticamente através da Análise de Variância (ANOVA) e teste de “Tukey” ao nível de 95%. Para avaliação do teor de umidade inicial e massa específica aparente verde o delineamento foi inteiramente casualizado. Para as demais variáveis o delineamento foi o mesmo, entretanto com Arranjo Fatorial de 2 x 2 x 2 (Tabela 13), utilizando metodologia proposta por STEEL & TORRIE (1960). Antecedendo a ANOVA, aplicou-se o Teste de “Bartlett” para verificação da homogeneidade de variâncias.

TABELA 13. FATORES E NÍVEIS ADOTADOS NA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

FATORES	NÍVEIS	OBSERVAÇÕES
A – Temperatura	a <sub>0</sub>	90°C
	a <sub>1</sub>	70°C
B – Velocidade do ar	b <sub>0</sub>	4m/s
	b <sub>1</sub>	2m/s
C – Inversor de frequência	c <sub>0</sub>	Variável
	c <sub>1</sub>	Constante

As variáveis coletadas automaticamente por meio do sistema de gerenciamento de secagem (Tabela 14) foram analisadas preliminarmente aplicando-se matriz de correlação e gráfico de dispersão, o que permitiu a escolha do modelo matemático que melhor representar os dados observados.

O modelo matemático escolhido em função da tendência dos dados foi ajustado pelo Método dos Mínimos Quadrados. A validade dos modelos foi analisada levando-se em conta o Coeficiente de Determinação ajustado ( $R^2$ ), o Erro Padrão da Estimativa relativo ( $S_{yx}\%$ ), além do valor de “F” da Análise de Variância da Regressão.

TABELA 14. VARIÁVEIS UTILIZADAS NA ANÁLISE DE REGRESSÃO

VARIÁVEIS ANÁLISADAS NA REGRESSÃO	
T	Tempo de secagem (h)
TUP	Teor de umidade por pesagem (%)
TUE	Teor de umidade resistivo (%)
TXS	Taxa de secagem (%U/h)
Wh	Consumo de energia elétrica (Wh) sem uso do inversor de frequência
Wh <sub>CV</sub>	Consumo de energia elétrica (Wh) com uso do inversor de frequência

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE CIRCULAÇÃO DE AR E DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA CÂMARA DE SECAGEM

#### 4.1.1 Velocidade de circulação do ar na câmara de secagem

Foram tomadas medidas de velocidade do ar na saída da pilha de madeira após o perfeito gradeamento das mesmas, antecedendo cada secagem. Na Tabela 15, são apresentados os valores médios e seus mínimos e máximos obtidos para as velocidades do ar de 2 e 4m/s.

TABELA 15. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS OBTIDOS DAS VELOCIDADES DO AR DE 2 E 4m/s, ADOTADAS NOS PROGRAMAS DE SECAGEM

Velocidades nominais (m/s)	Velocidades medidas (m/s)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)	Valores mín. / máx. (m/s)
2,0	2,22	0,250	11,26	1,70 / 2,60
4,0	4,03	0,275	6,82	3,40 / 4,60

Para os programas de secagem que utilizaram velocidade nominal de 2m/s mediu-se uma velocidade do ar média de 2,22m/s e obteve-se um coeficiente de variação de 11,26% entre os programas executados. Para os programas que utilizaram velocidade nominal de 4m/s mediu-se uma velocidade média de 4,03m/s e obteve-se um coeficiente de variação de 6,82% entre os programas. A velocidade do ar apresentou uma amplitude média de 1,7 (mínimo) para 2,6m/s (máximo) na velocidade do ar de 2m/s e de 3,4 para 4,6m/s para os programas de 4m/s. As variações encontradas foram consideradas aceitáveis devido à dificuldade de conseguir medições precisas de velocidades do ar na saída da pilha a qual sofre influência direta da turbulência do ar gerada no interior da câmara. A velocidade do ar exerce grande influência na taxa de secagem, sendo comprovada por vários estudos realizados por SANTINI (1996), SIMPSON (1997), MILOTA & TSCHERNITZ (1990), SEVERO (1986),

TOMASELLI (1981), STEINHAGEN (1974), SALAMON (1969), TOGERSON (1940), entre outros.

#### 4.1.2 Vazão de ar na câmara

A vazão de ar na câmara foi obtida através da medição da área de passagem e da velocidade do ar na saída da pilha (Tabela 16) para cada secagem realizada.

TABELA 16. VALORES MÉDIOS, DA VAZÃO DE AR, OBTIDOS PARA AS VELOCIDADES NOMINAIS DO AR DE 4 E 2m/s PARA AS PROGRAMAS DE SECAGEM

Velocidades nominais (m/s)	Velocidades medidas (m/s)	Área de passagem (m <sup>2</sup> )	Vazão média de ar (m <sup>3</sup> /h)
4,0	4,03	0,2076	3012
2,0	2,22	0,3696	2954

Para os programas que utilizaram velocidade nominal de 4ms obteve-se a vazão de ar média de 3012m<sup>3</sup>/h e para a velocidade nominal de 2m/s a vazão média foi de 2954 m<sup>3</sup>/h. Esta avaliação serviu de base para os cálculos da vazão mínima necessária para cada fase dos programas que utilizaram o inversor de frequência para avaliar a velocidade do ar durante a secagem da madeira.

Os valores da vazão de ar são constantes dentro de uma câmara de secagem de madeiras. Porém pode-se observar que ocorreram pequenas variações nas medições, causadas provavelmente por perdas laterais, pelo aumento da pressão estática no ventilador e por erros experimentais ocasionados na coleta dos dados. Estas variações são consideradas normais na utilização de um equipamento semi-industrial.

#### 4.1.3 Consumo de energia elétrica com variação da rotação do motor na câmara

Os resultados de consumo de energia elétrica (kWh) numa determinada rotação foram transformados em valores relativos (Tabela 17). Como trabalho elétrico (W) é o produto da potência com o tempo, considerando o tempo de 1 (uma) hora o valor do trabalho

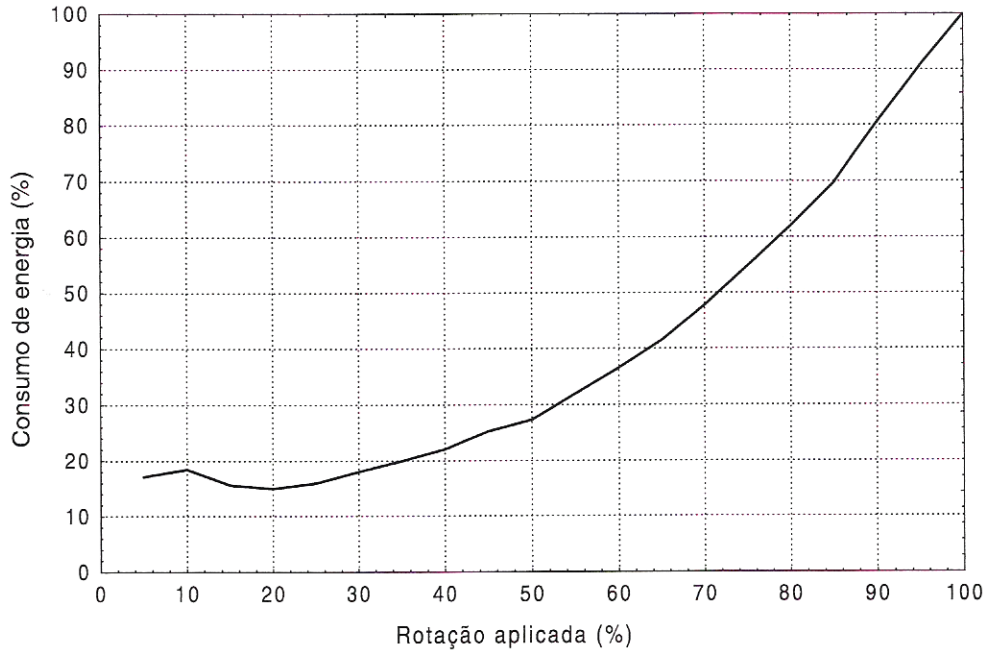
elétrico é igual à potência.

TABELA 17. CONSUMO RELATIVO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR DO VENTILADOR NA CÂMARA DE SECAGEM

Rotação fornecida (%)	Energia média consumida (kWh)	Rotação (rpm)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Consumo de energia (%)	Economia de energia (%)
100	0,6995	1750	2983	100	0
95	0,6349	1662	2834	90,77	9
90	0,5633	1575	2685	80,53	19
85	0,4874	1488	2535	69,68	30
80	0,4329	1400	2384	61,88	38
75	0,3829	1312	2237	54,75	45
70	0,3336	1225	2088	47,70	52
65	0,2902	1137	1939	41,48	59
60	0,2552	1050	1790	36,49	64
55	0,2234	962	1641	31,94	68
50	0,1909	875	1491	27,30	73
45	0,1697	787	1342	25,21	75
40	0,1513	700	1193	22,04	78
35	0,1351	611	1044	19,93	80
30	0,1247	525	895	18,01	82
25	0,1131	437	746	15,99	84
20	0,1051	350	597	15,01	85
15	0,1134	262	447	15,65	84
10	0,1302	175	298	18,45	82
05	0,1178	87	149	17,12	83

O consumo médio relativo de energia elétrica sofreu redução com a diminuição da rotação do motor do ventilador. O inversor de frequência que controlou automaticamente o processo de variação da rotação do motor o qual estava acoplado ao sistema de gerenciamento de secagem. Com os resultados construiu-se um gráfico (Figura 22), para visualização do consumo de energia ocorrida em função da variação da frequência fornecida.

FIGURA 22. CONSUMO DE ENERGIA RELATIVA EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO RELATIVA FORNECIDA AO MOTOR DO VENTILADOR DA CÂMARA DE SECAGEM



Pode-se observar que a energia consumida apresenta um comportamento exponencial com relação à frequência aplicada, ou seja, com uma pequena redução na frequência obtém-se uma alta economia de energia. Fornecendo-se ao motor do ventilador 90% da rotação (1577rpm), obteve-se uma economia de 19% na energia consumida naquele instante e fornecendo 50% da rotação (875rpm), obteve-se economia de 73% na energia consumida. Pode-se observar (Tabela 17 e Figura 22), que a partir do fornecimento de 35% da rotação do motor do ventilador a economia de energia começa a ser menor chegando praticamente a estabilizar em 80%. Semelhantes resultados foram encontrados VRANIZAN & WOHLGEMUTH (1988). Segundo a SIEMENS (1998), observa-se na Figura 8, a curva padrão do consumo de energia e função do fluxo de ar. Confirmando os resultados encontrados neste estudo.

No final da curva (Figura 22), observa-se um pequeno aumento no consumo de energia elétrica com a redução da rotação do motor do ventilador causado pelo atrito e pela necessidade de romper a inércia, já que o rotor do motor funciona como um pequeno volante, o qual armazena energia cinética. Segundo LOBOSCO & DIAS (1989), nunca se deve aplicar



em motores, frequência inferior à 30HZ, ou seja, 50% da rotação por causar sobre aquecimento pela deficiência gerada na refrigeração dos mesmos, podendo resultar em sua queima.

## 4.2 EFEITO DOS PROGRAMAS NO TEMPO DE SECAGEM

### 4.2.1 Programas de secagem

As Figuras 23 e 24, apresentam os programas de secagem para as temperaturas de 70°C e 90°C respectivamente. Pode-se observar o comportamento da temperatura do termômetro de bulbo seco (TBS), do termômetro de bulbo úmido (TBU), do teor de umidade da madeira obtido por pesagem da carga (método gravimétrico) e pela utilização de cabos com pinos sensores (método resistivo).

O comportamento das curvas em ambas as temperaturas foram semelhantes para todos programas estudados. Quando a madeira atingiu um teor de umidade médio entre 30 a 35%, ou seja, ao redor do ponto de saturação das fibras (PSF) as curvas praticamente se sobrepuseram a partir deste ponto, mantendo-se desta forma até o final da secagem. Pode-se observar que o teor umidade da madeira obtido por meio dos pinos sensores não apresentaram medida de teor de umidade inicial superiores a 90%, ficando sempre abaixo dos valores encontrados pelo método de pesagem. Segundo SKAAR (1972); MAKAY (1976); CHEN (1994); HOLMES & FORRER (1989), isto deve-se à resistividade da madeira tornar-se muito pequena acima do ponto de saturação das fibras, praticamente constante inviabilizando a medição do teor de umidade com precisão.

FIGURA 23. CURVA GENÉRICA DE SECAGEM DE MADEIRA PARA A TEMPERATURA DE 70°C

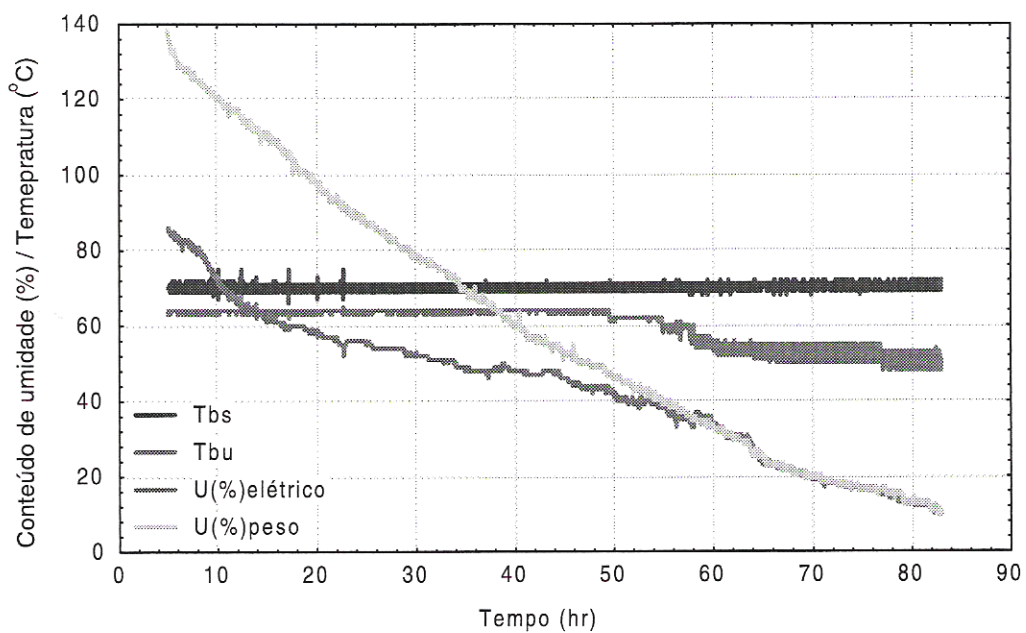
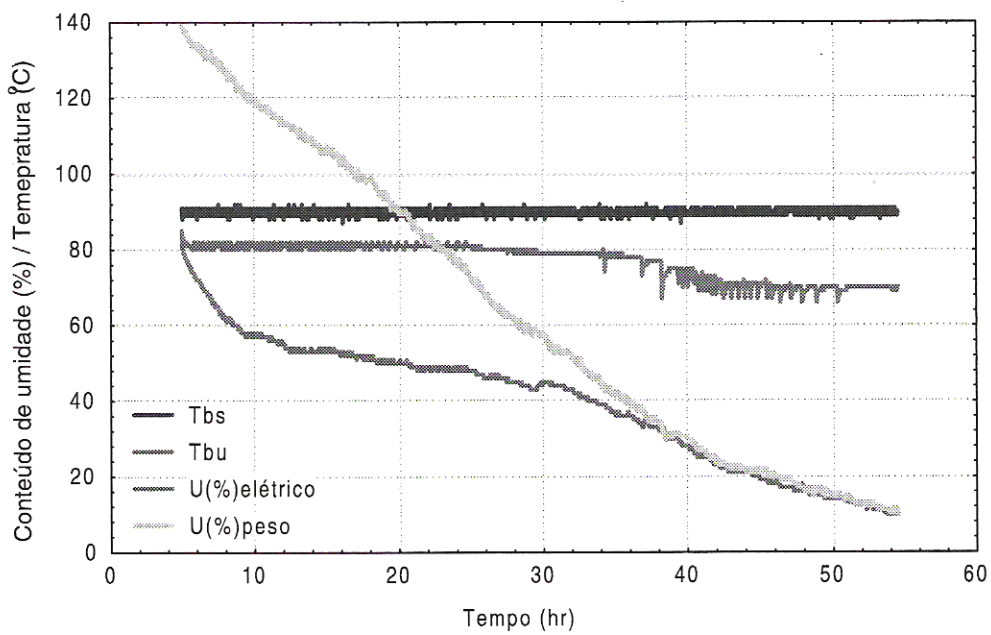


FIGURA 24. CURVA GENÉRICA DE SECAGEM DA MADEIRA PARA A TEMPERATURA DE 90°C



Onde:

Tbs = termômetro bulbo seco (°C);

Tbu = termômetro bulbo úmido (°C);

$U(\%)_{\text{elétrico}}$  = umidade medido pelos pinos sensores elétricos (%);

$U(\%)_{\text{peso}}$  = umidade medido pela pesagem da carga (%).

As curvas obtidas pelos pinos sensores apresentaram valores satisfatórios a partir de um teor de umidade em torno de 30 a 35 %, quando passaram a acompanhar as curvas de umidade obtidas por pesagem até a umidade final desejada (10%). FORRER (1984), desenvolveu um sistema de monitoramento eletrônico para medição constante do teor de umidade pelos métodos gravimétrico e resistivo durante a secagem. Este estudo encontrou resultados semelhantes ao de FORRER (1984) Mostrando que quando a madeira atingiu aproximadamente 30% as duas curvas de teor de umidade (método gravimétrico e resistivo) passaram a seguir próximas até o final do processo. Tais resultados comprovam que quando o teor de umidade da madeira estiver próximo do ponto de saturação das fibras, poderão ser utilizados os pinos sensores para controle do processo de secagem com precisão Tais resultados foram encontrado por SANTINI (1996).

As curvas de teor de umidade (Figuras 25 e 26), obtidas por pesagem nos programas estudados apresentaram um comportamento estável, com valores de umidade inicial em torno de 140%. FORRER (1984) e SANTINI (1996), do mesmo modo, obtiveram um controle regular da umidade utilizando o mesmo sistema recomendando sua utilização para controlar o processo de secagem. WEGERT & EVANS (1971), concluíram que embora seja um sistema mais caro, apesar da possibilidade de controle automático a aceitação deste sistema dependerá da eficiência na diminuição do tempo de secagem.

Nas Figuras 25 e 26, as curvas representam a perda de umidade em função do tempo nas velocidades do ar de 4 e 2m/s respectivamente para as temperaturas de 70 e 90°C. Além disso, apresentam a influência do uso inversor de frequência nas duas temperaturas.

FIGURA 25. CURVAS DE SECAGEM PARA 4m/s COM E SEM UTILIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NAS TEMPERATURAS DE 70 E 90°C

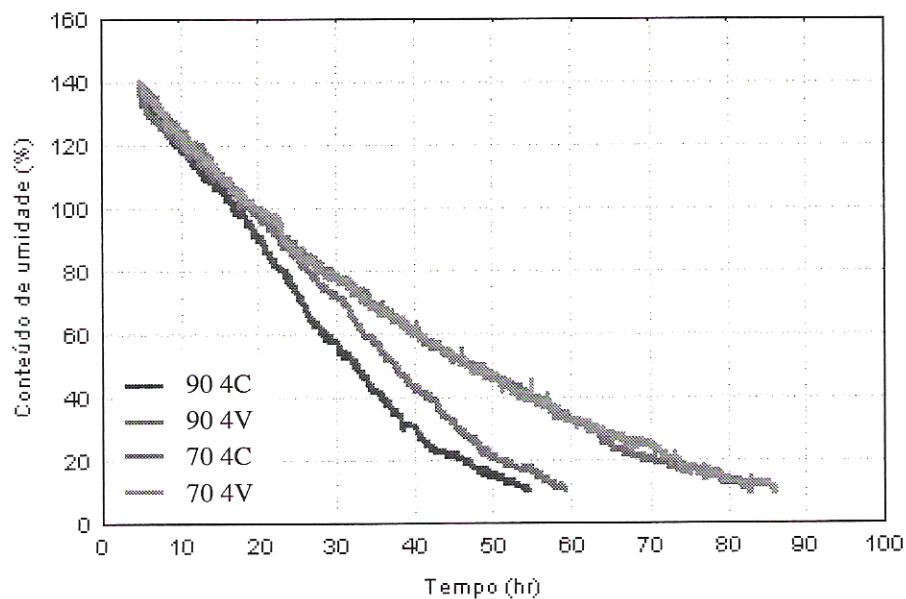
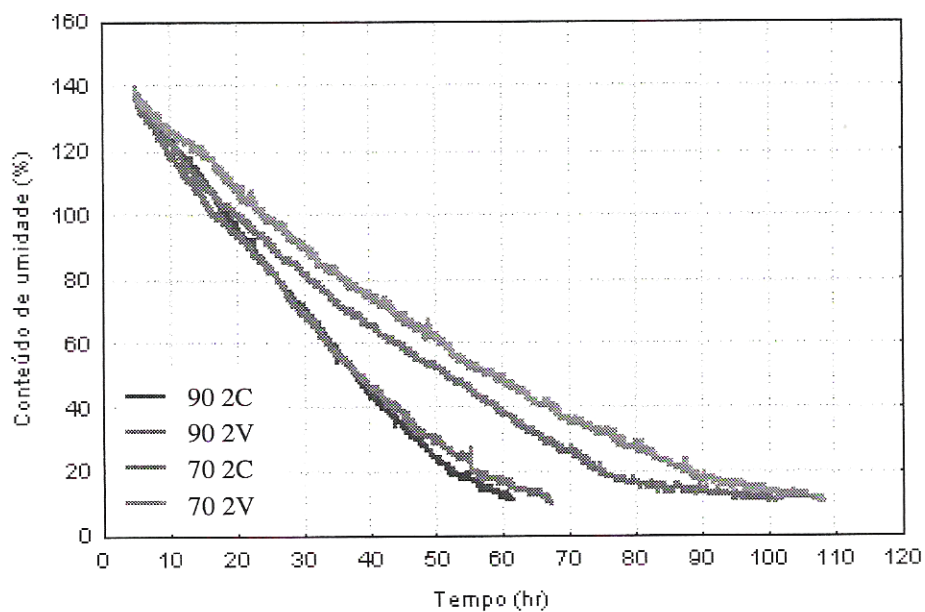


FIGURA 26. CURVAS DE SECAGEM PARA 2m/s COM E SEM UTILIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NAS TEMPERATURAS DE 70 E 90°C



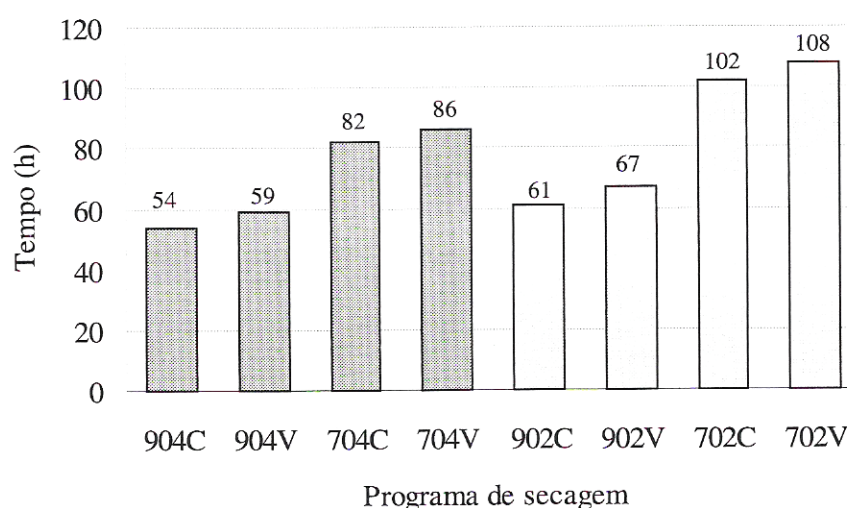
#### 4.2.2 Influência do uso do inversor de frequência

O inversor de frequência influenciou o tempo total de secagem independente da

velocidade do ar e da temperatura em todos os programas estudados. Os tempos foram maiores com o uso do inversor (Figura 27). Nos programas que utilizaram 90°C o aumento médio foi de 8,7% e na temperatura de 70°C foi de 5,1%. Pode-se observar que os programas de 90°C tiveram maior influência no tempo de secagem quando utilizou inversor de frequência.

Segundo RESH & ECKLUND (1964), além dos fatores externos (temperatura, umidade relativa, velocidade do ar) deve-se considerar a influência das propriedades físicas e a estrutura anatômica da madeira na taxa de secagem. Além disso, qualquer diferença que possa ter ocorrido com relação ao teor de umidade inicial, delta T ou o tempo de permanência em cada fase do programa de secagem, poderia alterar os cálculos da vazão mínima necessária afetando desta forma, o tempo total de secagem. VRANIZAN & WOHLGEMUTH (1988), concluíram que a redução da velocidade do ar durante a secagem não causa aumento no tempo de secagem e nem afeta a qualidade da madeira. No entanto SHMIDT (1984), concluiu que a variação da velocidade do ar circulante permite uma economia considerável de energia, sem prolongação excessiva no tempo de secagem. Desta forma, pode-se considerar que o aumento no tempo causado pelo uso do inversor de frequência neste estudo não foi excessivo, necessitando ser feito alguns ajustes na aplicação do inversor de frequência para minimizar o efeito causado no tempo de secagem.

FIGURA 27. TEMPO DE SECAGEM PARA OS DIFERENTES PROGRAMAS



### 4.2.3 Influência da temperatura

A temperatura utilizada nos programas influenciou nos tempos de secagem. A temperatura de 90°C reduziu o tempo nas duas velocidades do ar. Na velocidade de 4m/s constante (Figura 27), na temperatura de 90°C a redução no tempo de secagem foi de 34,1% e para velocidade variável a redução foi de 31,4% quando se comparou com a temperatura de 70°C. Para velocidade do ar de 2m/s na mesma condição de temperatura obteve-se uma redução de 40,2% para velocidade do ar constante e uma diminuição no tempo de secagem na velocidade variável de 38,0%. Confirmando desta maneira a forte influência da temperatura no tempo de secagem.

Pode-se observar que as curvas utilizadas neste estudo sofreram influência da temperatura no tempo total de secagem numa mesma velocidade do ar, estando estes resultados de acordo com os encontrados por SANTINI (1996) e SEVERO (1986), ambos utilizaram *Pinus elliottii* com uma espessura de aproximadamente 25mm.. SANTINI (1996), encontrou um redução de aproximadamente 24% no tempo de secagem quando passou a temperatura de 70°C para 90°C (5m/s) e de aproximadamente 23%. (2,3m/s) nas mesmas condições. SEVERO (1986), encontrou em seus estudos uma redução de 59% no tempo de secagem quando passou a temperatura de 50°C para 80°C (5,5m/s) e uma diminuição de 57% (2,5m/s) nas mesmas condições de temperatura. Segundo RESH & ECKLUND (1964), os fatores que mais influenciam a taxa de secagem além da temperatura são teor de umidade inicial, massa específica e o número de anéis por polegada. SANTINI (1980), concluiu que a taxa de secagem de *Pinus elliottii* aumenta com a elevação da temperatura de forma linear na secagem e que quanto maior for o teor de umidade inicial maior a taxa de secagem encontrada.

### 4.2.3 Influência da velocidade do ar

Na Figura 27, quando a velocidade do ar passou de 2 para 4 m/s (constante) a redução no tempo de secagem na temperatura de 90°C foi de 11,5% e para velocidade variável a diminuição foi de 11,9%. Quando a velocidade do ar passou de 2 para 4m/s (constante) para a temperatura de 70°C a redução no tempo de secagem foi de 19,6% e para velocidade variável a redução foi de 20,4%.

Ao analisar o efeito da velocidade do ar no tempo de secagem pode-se observar que na temperatura de 70°C a velocidade do ar teve maior influência relativa no tempo de secagem e que o inversor de frequência quando atuou (velocidade variável), reduziu ainda mais o tempo de secagem quando a velocidade do ar passou de 2 para 4m/s nas duas temperaturas analisadas. Semelhantes resultados foram encontrados por SEVERO (1986) com relação a redução no tempo de secagem com o aumento da velocidade do ar, no entanto o autor encontrou maior influência da velocidade do ar em temperaturas maiores apesar das reduções relativas no tempo de secagem serem menores que as encontradas neste estudo. No entanto, SANTINI (1996), encontrou reduções relativas bem superiores no tempo de secagem de aproximadamente 33,5% no tempo de secagem nos programas de 70 e 90°C, quando a velocidade do ar passou de 2,3 para 5m/s, não encontrando praticamente diferença no tempo para as duas temperaturas de secagem quando a velocidade do ar passou de 2,3 para 5m/s. O que provavelmente afetou o tempo de secagem nos estudos realizados foram as características intrínsecas da espécie estudada, além da espessura, teor de umidade inicial, idade das árvores, entre outras razões. Segundo WALKER (1993), a quantidade de água a ser transportada para à superfície e para ser evaporada é proporcional a massa específica e a espessura da madeira, sendo o tempo de secagem proporcional a quantidade de água a ser removida e inversamente proporcional a taxa de evaporação.

#### 4.3 TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem (perda de umidade por unidade de tempo), foi calculada utilizando diferentes intervalos de umidade (Tabela 09), levando em consideração a perda de umidade em porcentagem de umidade por hora (%U/h) e quilograma de umidade por hora (kgU/h) (Tabela 18).

TABELA 18. TAXA DE SECAGEM (%U/h) E (kgU/h) PARA DIFERENTES FAIXAS DE TEORES DE UMIDADE PARA TODOS OS PROGRAMAS ESTUDADOS

Faixa de umidade (%)	TAXA DE SECAGEM (kgU/h)							
	70 2C	70 2V	70 4C	70 4V	90 2C	90 2V	90 4C	90 4V
1) verde - 80	5,16	5,12	6,19	6,26	7,09	6,90	7,71	7,37
2) 80 - 50	3,67	3,63	4,65	4,55	6,31	6,36	7,19	6,95
3) 50 - 30	3,36	2,97	3,52	3,11	5,75	4,79	6,70	6,49
4) 30 - 20	2,90	2,47	3,09	2,27	3,25	2,87	4,13	4,03
5) 20 - 10	1,78	0,80	2,90	1,60	2,90	1,44	2,58	1,18

Faixa de umidade (%)	TAXA DE SECAGEM (%U/h)							
	70 2C	70 2V	70 4C	70 4V	90 2C	90 2V	90 4C	90 4V
1) verde - 80	2,99	2,85	3,27	2,97	2,90	3,10	3,75	3,41
2) 80 - 50	2,10	2,01	2,24	2,34	2,70	2,68	3,33	3,18
3) 50 - 30	1,87	1,58	1,98	1,65	2,65	2,50	3,23	2,85
4) 30 - 20	1,76	1,47	1,88	1,31	2,56	2,34	3,07	2,68
5) 20 - 10	1,50	1,30	1,65	1,15	2,33	2,09	2,64	2,21

Em todos os programas as taxas de secagem apresentaram a mesma tendência ao longo das faixa de umidade preestabelecidas, independente da forma de como foram calculadas. Observou-se uma tendência (Tabela 18), de redução ao longo das faixas e quando aplicou-se o inversor de frequência nos programas a taxa de secagem foi reduzida. Os resultados ainda sofreram influência da temperatura e da velocidade do ar.

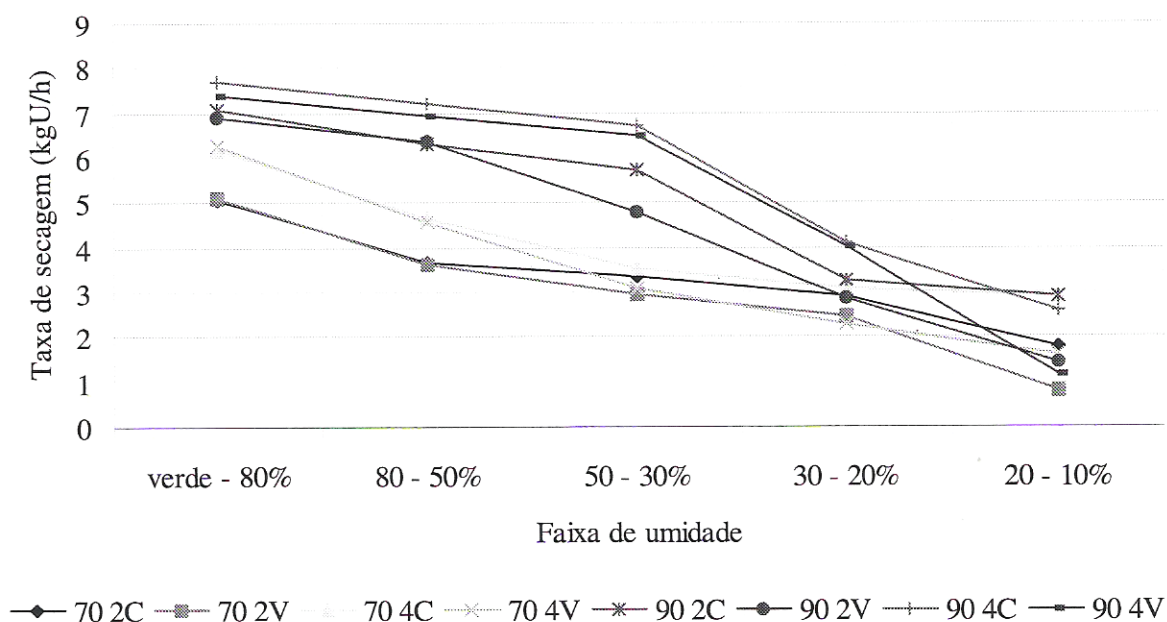
A taxa de secagem reduziu progressivamente em todas as faixas de umidade quando calculada tanto em “kgU/h” ou em “%U/h” em todos os programas. O comportamento da taxa de secagem na primeira faixa (verde – 80%), na temperatura de 70°C com 2m/s constate, foi de 5,16 kgU/h e na temperatura de 90°C com 4m/s constante, foi de 7,71kgU/h. A mesma tendência foi encontrada nas demais faixas de umidade quando comparou-se os resultados entre os programas. Comprovando a influência da temperatura e da velocidade do ar na taxa de secagem.

Pode-se observar na Figura 28, as elevadas taxas de secagem desde o início do processo em todos os programas até a terceira faixa de umidade (50 até 30%). É importante



salientar que, até este ponto (faixa 3) a retirada da umidade da madeira dá-se praticamente por capilaridade (água na forma livre). A partir deste ponto (PSF), mesmo tornando o ambiente no interior da câmara mais drástico (redução da umidade de equilíbrio) a taxa de secagem foi afetada pela dificuldade de retirar a umidade da madeira pelo processo de difusão, reduzindo consequentemente a taxa de secagem. Semelhantes resultados foram encontrados por SALAMON (1969); TOMASELLI (1977); MILOTA & TSCHERNITZ (1990); SEVERO (1986); SANTINI (1996); SIMPSON (1997) entre outros.

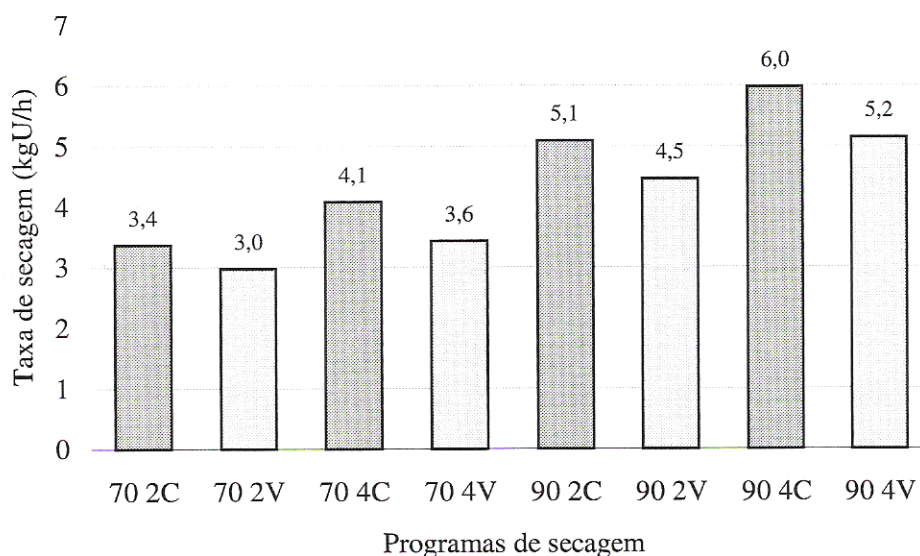
FIGURA 28. TAXA DE SECAGEM (kgU/h) PARA DIFERENTES FAIXAS DE TEORES DE UMIDADE PARA TODOS OS PROGRAMAS ESTUDADOS



#### 4.3.1 Influência do inversor de frequência

O uso do inversor de frequência causou uma pequena redução na média da taxa de secagem (Figura 29), para as duas velocidades do ar (4 e 2m/s) e duas temperaturas utilizadas (90 e 70°C). As reduções nas taxas de secagem causada pelo uso do inversor de frequência na temperatura de 70°C; 2m/s igual a 11,7%, 70°C; 4m/s igual a 12,2%. Para a temperatura de 90°C, 2m/s igual a 11,7% e 90°C, 4m/s igual a 13,3%.

FIGURA 29. INFLUÊNCIA DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NA TAXA DE SECAGEM MÉDIA NAS TEMPERATURAS DE 70 E 90°C E NAS VELOCIDADE DO AR DE 2 E 4m/s



O inversor de frequência passou a variar a rotação do motor para reduzir a vazão de ar depois da segunda fase dos programas. Ao observar a Tabela 09, nota-se que somente o programa que utilizou a condição 90°C, 4m/s variável, apresentou uso do inversor de frequência a partir da terceira fase, nos demais programas o inversor variou a vazão após a segunda. Voltando a Tabela 18, observar-se que as taxas de secagem praticamente não diferenciaram entre os programas na primeira e segunda faixa de umidade, comprovando que a atuação do inversor foi o que reduziu a taxa de secagem nos programas.

Observa-se na Tabela 18, que na quinta (5) faixa, quando calculou-se a taxa de secagem de 20 para 10% de teor de umidade, ocorreu uma redução elevada na taxa de secagem em todos os programas. Na Tabelas 09, verifica-se que nas duas últimas fases dos programas de secagem foram aplicadas rotações extremamente baixas pelo inversor de frequência (girando em média 34% da rotação total). A vazão aplicada seguiu rigorosamente o prescrito pelos cálculos de vazão mínima para as fases dos programas. Na Figura 22, são apresentados os índices de redução de energia e da rotação do motor, observa-se que quando foi aplicado índices abaixo de 40% na rotação do motor o efeito na redução no consumo de energia foi menor, não justificando o uso de vazões abaixo deste nível. Mesmos resultados são apresentados na Figura 8, por SIEMENS (1998).

A redução na taxa de secagem foi causada provavelmente pela variação da velocidade do ar através do inversor de frequência. Os valores encontrados na taxa de secagem provavelmente não inviabilizam a sua utilização na secagem da madeira. Segundo LOBOSCO & DIAS (1989), nunca deve ser aplicada rotações de 30HZ ao motor, o que corresponde a 50% da rotação, por afetar diretamente na refrigeração do mesmo podendo causar sobre aquecimento podendo levar o motor a queima. Segundo VRANIZAN & SHINN (2001), aplicações de pequenas reduções, obtém-se grandes reduções no consumo de energia.

CULPEPPER (1990) comenta que somente os sistemas de controle de câmaras automatizados são indicados para utilizar o inversor de frequência para redução da vazão por serem capazes de otimizar o uso do mesmo, sugerindo que abaixo do ponto de saturação das fibras deve-se aplicar a redução da vazão. SHMIDT (1984), comenta que para evitar aumentos no tempo de secagem deve-se medir e controlar o fluxo de ar dentro da pilha de madeira dentro do secador, para que se possa otimizar o rendimento econômico do mesmo.

#### **4.3.2 Influência da temperatura**

Nas Figuras 30 e 31, são apresentadas as taxas de secagem para as temperatura de 70 e 90°C nas velocidades do ar (2 e 4m/s), com velocidade constante ou variável pelo uso do inversor de frequência. As curvas de 90°C apresentaram uma taxa de secagem superior à temperatura de 70°C. Para SALAMON (1973), BACHRICH (1987), SEVERO (1989), SANTINI (1996), TOMASELLI (1981) a temperatura exerce uma influência significativa e direta na taxa de secagem.

FIGURA 30. TAXA DE SECAGEM PARA OS PROGRAMAS DE 70°C NAS VELOCIDADES DE 2 E 4m/s

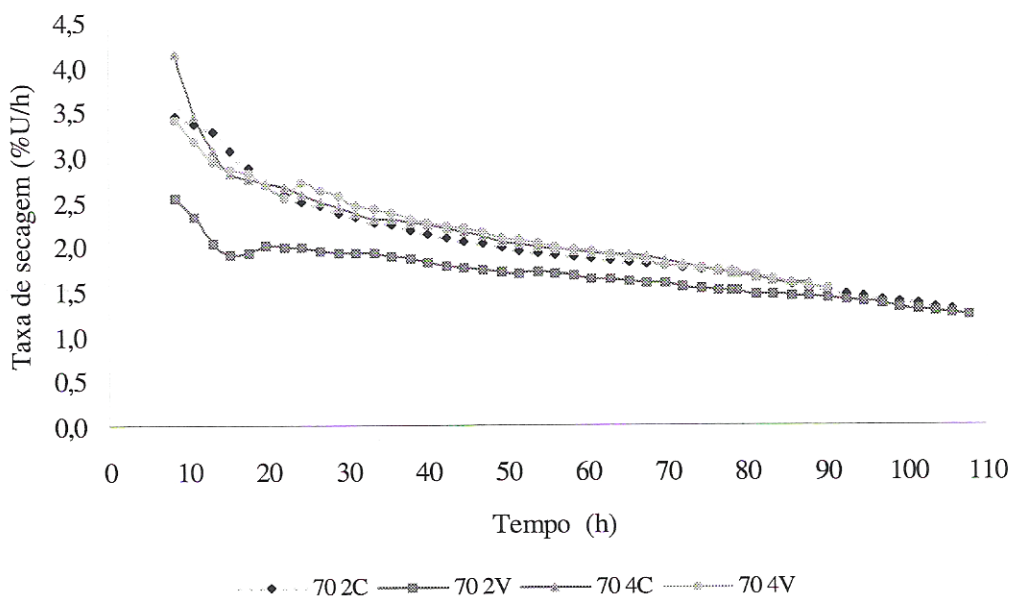
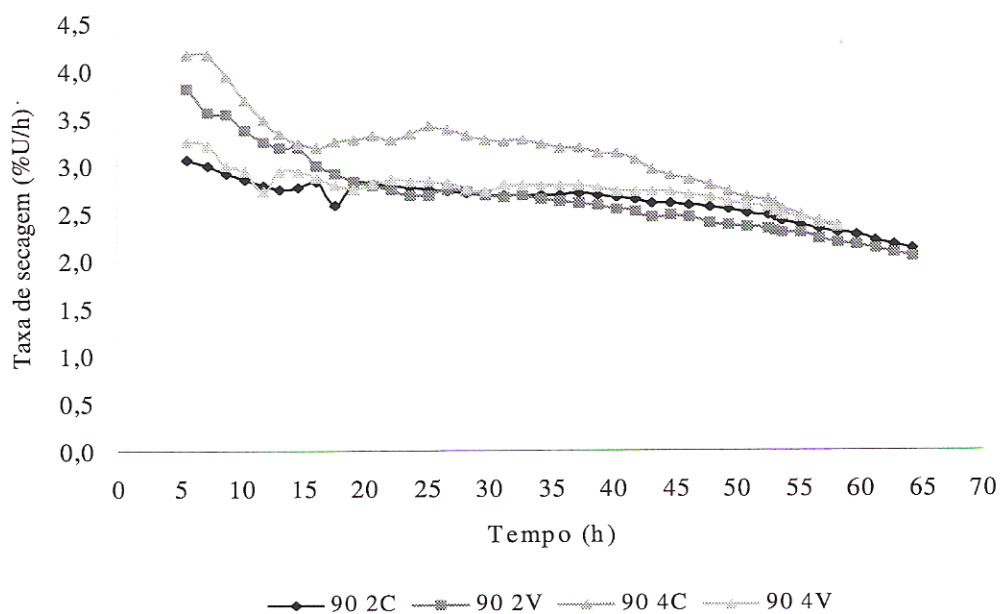


FIGURA 31. TAXA DE SECAGEM PARA OS PROGRAMAS DE 90°C NAS VELOCIDADES DE 2 E 4m/s



Nas Figuras 30 e 31, observa-se inicialmente uma taxa de secagem elevada caindo rapidamente, podendo isto ser associado ao primeiro estágio da secagem seguido do segundo estágio o qual teve início quando a água livre da superfície foi totalmente retirada dando início a contração da madeira e com ela o aparecimento de tensões internas causadas por gradientes de umidade, sendo interessante que o primeiro estágio da secagem seja mantido o máximo de tempo possível.

Pode-se observar que o aumento da temperatura ocasionou pequeno aumento na taxa de secagem nos programas o que contribuiu para reduzir os tempos de secagem (Figura 29). Semelhantes resultados foram encontrados por CECH & PFAFF (1977), o qual concluiu que, em geral, quanto maior a temperatura, maior a taxa de secagem, e em consequência menor o tempo de secagem. Segundo KOLMANN & CÔTÉ (1968), quanto maior a temperatura maior a taxa de secagem, porque o calor é a fonte da qual as moléculas d'água da madeira adquirem energia cinética necessária para provocar a evaporação, a qual depende tanto da quantidade de energia fornecida por unidade de tempo, como da capacidade do ar de adsorver umidade. Estudos conduzidos por SEVERO (1986), SANTINI (1996), TOMASELLI (1981), MILOTA & TSCHERNITZ (1990), comprovam a influência diretamente proporcional da temperatura na taxa de secagem.

TOMASELLI (1977) encontrou em seus estudos dois estágios durante a secagem da madeira abaixo de 100°C, no primeiro estágio da secagem a porção linear da curva correspondem aos movimentos da água até a superfície predominantemente capilares e pela expansão da bolhas de ar existentes no interior da madeira dependendo sua duração da capacidade de transferência de água à superfície para ser evaporada.

O segundo estágio é considerado um ponto importante tanto na teoria como no ponto de vista pratico. Ele se inicia quando toda a água livre existente na superfície é evaporada, e a temperatura da superfície da madeira é aumentada terminando quando toda água livre do interior da madeira for evaporada. O segundo estágio é considerado extremamente complexo, por existir uma interação entre o movimento de calor para o interior da madeira e o fluxo de massa de vapor do interior para a superfície do material (FLEISCHER, 1953; HART; 1965 WRIGHT, 1961).

### 4.3.3 Influência da velocidade do ar

A velocidade do ar aumentou a taxa de secagem em todos os programas (Figura 29). O aumento na taxa de secagem média quando a velocidade do ar passou de 2 para 4m/s na temperatura de 70°C constante, foi igual a 17,1%, e na temperatura de 70°C variável, foi igual a 16,7%, para a temperatura de 90°C constante a taxa de secagem foi igual a 15,0% e na temperatura 90°C variável, foi igual a 13,5%. Na temperatura de 70°C obteve-se os maiores aumentos relativos na taxa de secagem quando a velocidade do ar passou de 2 para 4m/s, mas em termos nominais foi na temperatura de 90°C constante, que a taxa de secagem média chegou a atingir 6%U/h.

Ao observar a Tabela 15 e a Figura 27, com relação ao efeito da velocidade do ar na taxa de secagem, pode-se dizer que mesmo quando foi utilizado a velocidade do ar constante, ou seja sem a utilização inversor de frequência para reduzir a vazão de ar, a taxa de secagem caiu bastante nas duas velocidades do ar estudadas (2 e 4m/s). A partir da quarta faixa de umidade (Tabela 18), a água a ser retirada foi praticamente por difusão, comprovando desta forma a pouca influência da velocidade do ar na a taxa de secagem abaixo desta umidade.

SIMPSON (1997) estudou o efeito da velocidade do ar na taxa de secagem encontrando um efeito altamente significativo quando utilizou elevadas velocidades do ar na madeira acima de 40 a 50% de teor de umidade a partir deste ponto velocidade menores podem ser utilizadas. MILOTA & TSCHERNITZ (1990), da mesma forma encontraram uma alta correlação entre a taxa de secagem e a velocidade do ar até aproximadamente o ponto de saturação das fibras. SALAMON (1969) e STEINHAGEN (1974), encontraram uma grande influência da velocidade do ar somente acima de 40% de umidade, abaixo desta umidade, a velocidade do ar apresentou pouca influência.

Com base nestas observações a utilização do inversor de frequência na secagem da madeira para reduzir a velocidade do ar durante as fases da secagem são altamente relevantes. Segundo BUNNER & HILDEBRAND (1987), com o conhecimento da velocidade ótima do ar durante cada etapa das fases do programa de secagem, maior eficiência no processo será alcançado, reduzindo os custos com a secagem.

#### 4.3.4 Análise de regressão na taxa de secagem

Inicialmente foi aplicada matriz de correlação para analisar as interações que ocorreram entre as variáveis de interesse. A taxa de secagem foi analisada em todos os programas com seguintes variáveis (Tabela 19):

- 1) Taxa de secagem (TXS) com Tempo de secagem (T);
- 2) Taxa de secagem (TXS) com Teor de umidade por pesagem (TUP).

TABELA 19. CORRELAÇÕES ENCONTRADAS ENTRE A TAXA DE SECAGEM E O TEMPO E ENTRE O TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM NOS PROGRAMAS

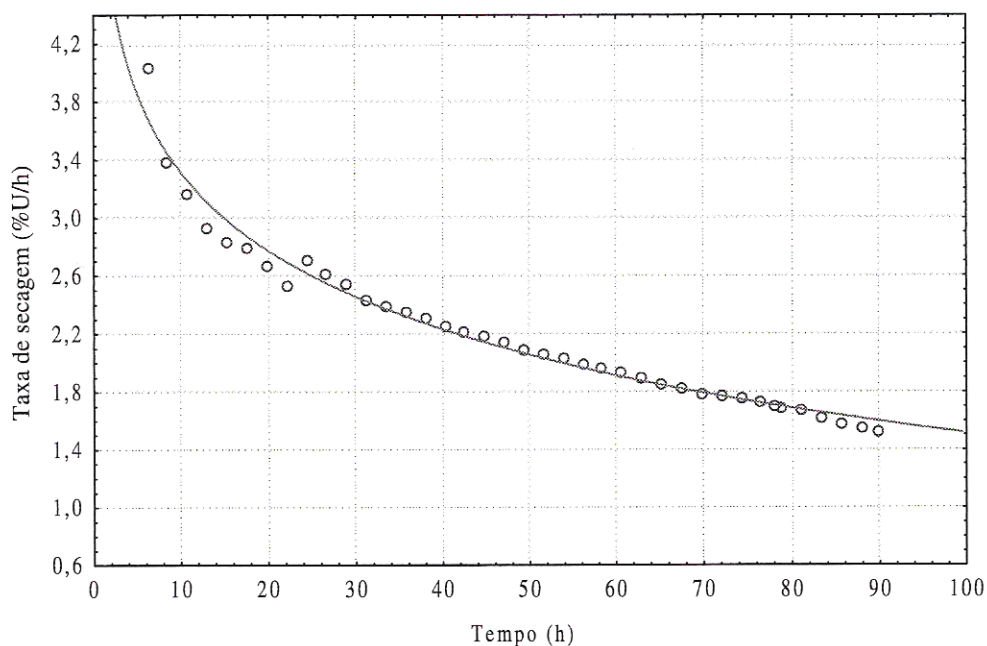
Variáveis	TAXA DE SECAGEM (kgU/h)							
	70 2C	70 2V	70 4C	70 4V	90 2C	90 2V	90 4C	90 4V
1) T	-0.86	-0.84	-0.72	-0.93	-0.85	-0.84	-0.75	-0.67
2) TUP	0.92	0.86	0.78	0.97	0.83	0.87	0.75	0.67

Pode-se observar na Tabela 19, que a taxa de secagem (TXS) apresenta uma correlação inversa com o tempo (T), enquanto que a taxa de secagem apresenta uma correlação direta com o teor de umidade por pesagem (TUP). Aplicou-se modelos em função da tendência observada dos dados. Foi analisada inicialmente a correlação entre a taxa de secagem (TXS) e o tempo (T).

A maior correlação encontrada da taxa de secagem com o tempo foi no programa 70 4V (-0,93), observado a dispersão dos dados (Anexo 31) optou-se pela escolha de um modelo logarítmico decrescente ( $y = a - b \cdot \ln(x)$ ). O modelo ajustado apresentou Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) igual a 0,97, Erro Padrão da Estimativa ( $S_{yx}\%$ ) igual a 3,85% e valor de “F” da regressão igual a 1572, indicando que o mesmo estima a taxa de secagem em função do tempo com bom grau de precisão. Os coeficientes da regressão gerada apresentaram-se altamente significativos, justificando suas presenças no modelo. Na Figura 32, observa-se a aplicação do modelo proposto para a taxa de secagem em função do tempo. A equação gerada em função da aplicação da análise de regressão foi a seguinte:

$$TXS = 5,1226 - 0,7838 \cdot \ln(T)$$

FIGURA 32. REGRESSÃO LINEAR LOGARÍTMICA DECRESCENTE AJUSTADA PARA ESTIMAR A TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM

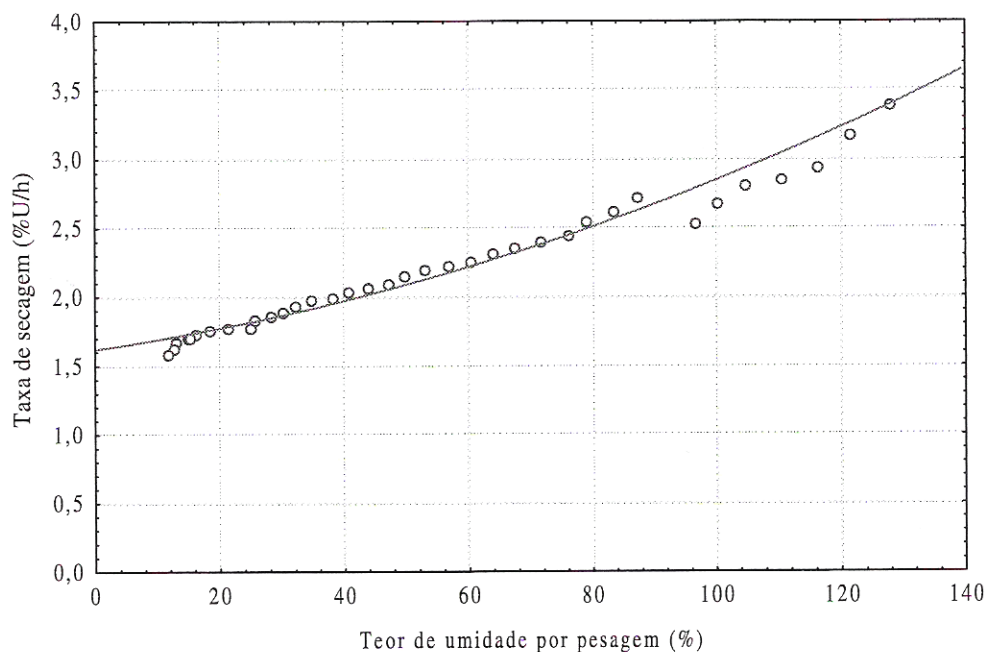


A maior correlação encontrada da taxa de secagem com o teor de umidade por pesagem foi no mesmo programa 70 4V (0,97), observando a dispersão dos dados (Anexo 34) optou-se pela escolha de um modelo de segunda ordem ( $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2$ ). O modelo ajustado apresentou Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) igual a 0,95, Erro Padrão da Estimativa ( $S_{yx}$ ) igual a 10,19% e valor de “F” da regressão igual a 343,21, indicando que o mesmo estima a taxa de secagem em função do tempo com bom grau de precisão. Os coeficientes da regressão gerada apresentaram-se altamente significativos, justificando suas presenças no modelo. Na Figura 33, observa-se a aplicação do modelo proposto para a taxa de secagem em função do teor de umidade por pesagem. A equação gerada em função da aplicação da análise de regressão foi a seguinte:

$$TXS = 1,620464 + 0,00646 \cdot (TUP) + 0,000058 \cdot (TUP)^2$$



FIGURA 33. REGRESSÃO LINEAR DE SEGUNDA ORDEM AJUSTADA PARA ESTIMAR A TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM



#### 4.4 QUALIDADE DA MADEIRA APÓS A SECAGEM

##### 4.4.1 Massa específica da madeira

###### 4.4.1.1 Massa específica aparente verde

Pode-se observar na Tabela 20, que os resultados médios da massa específica aparente verde foram muito próximos entre os lotes, variando de 0,98 a 1,01 g/cm<sup>3</sup>. Apesar do coeficiente de variação encontrados serem considerados normais os valores mínimos e máximos variam na média de 0,85 a 1,07g/cm<sup>3</sup>, sendo considerada alta dentro dos lotes, entretanto, esta variação elevada da massa específica foi encontrada em todos os lotes.

TABELA 20. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE VERDE (MEAV), DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Programa	Massa específica aparente verde (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão (g/cm <sup>3</sup> )	Coef. de variação (%)	Valores mín. / máx. (%)
70 2C	0,98	0,05	5,58	0,82 / 1,07
70 2V	0,99	0,04	4,03	0,90 / 1,09
70 4C	1,01	0,05	4,52	0,85 / 1,06
70 4V	1,01	0,03	3,14	0,87 / 1,05
90 2C	0,99	0,06	5,79	0,85 / 1,10
90 2V	0,99	0,06	6,29	0,79 / 1,07
90 4C	1,00	0,04	4,26	0,86 / 1,05
90 4V	1,01	0,03	3,43	0,89 / 1,06

A análise estatística (Anexo 1) comprovou que a massa específica aparente verde foi igual estatisticamente ( $F = 0,24$   $\rho = 0,97$ ), entre todos os lotes, ou seja, ela influenciou da mesma maneira todos os lotes durante a secagem. A massa específica afeta diretamente a taxa de secagem. Normalmente madeiras com alta massa específica são difíceis de secar necessitando de maior tempo e madeiras leves de baixa massa específica geralmente secam com maior velocidade, portanto em menor tempo.

A massa específica verde não faz parte direta dos objetivos deste estudo, mas poderiam afetar os tempos de secagem se fosse encontrada diferenças entre os lotes. Segundo HART (1966), o tempo de secagem normalmente é diretamente proporcional a massa específica na evaporação da umidade superficial e diretamente proporcional ao quadrado da mesma no caso da difusão da umidade da madeira à superfície. Segundo KOLLMANN e CÔTÉ (1968), o tempo de secagem é influenciado pela massa específica da madeira, teor de umidade inicial, espessura, características anatômicas, entre outras.

#### 4.4.1.2 Massa específica aparente seca

A massa específica aparente seca média (Tabela 21) variou de 0,47 a 0,48 g/cm<sup>3</sup> entre os lotes, sendo consideradas iguais, assim como, na condição verde. O coeficiente de variação

médio foi de 11,29% entre os lotes, considerado alto e a amplitude média encontrada foi de 0,38 a 0,57g/cm<sup>3</sup>, esta variação também muito grande, ocorreu em todos os lotes.

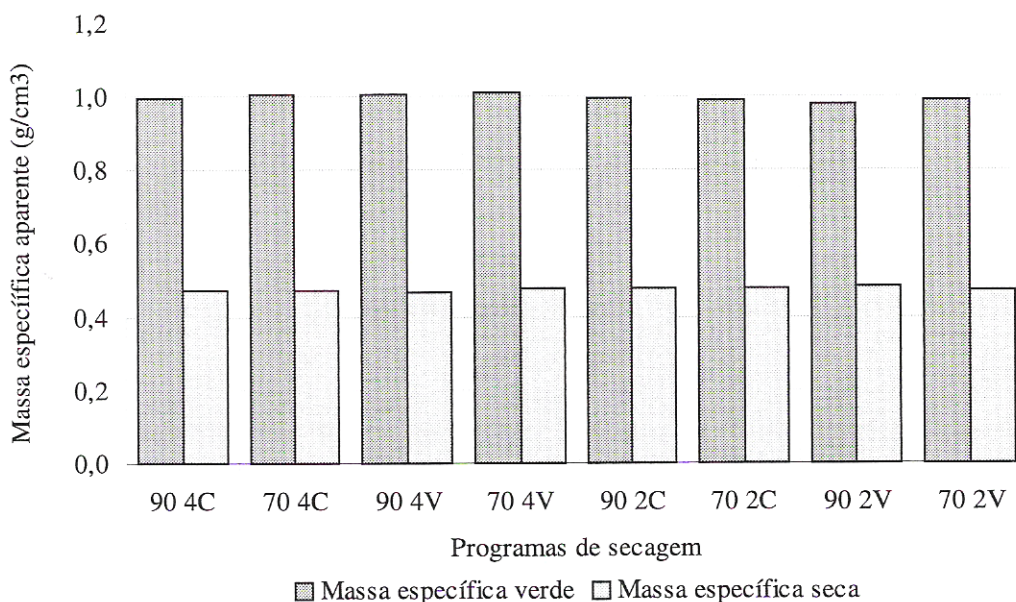
A variação encontrada dentro dos lotes podem ter ocorrido devido a diferença existente entre as amostras, com relação a porcentagem de lenho tardio e a presença de madeira juvenil. Foi realizada uma análise de variância (Anexo 4) para verificar se houve influência dos fatores na massa específica aparente seca e não foi detectada diferença entre os lotes. Portanto, a variabilidade encontrada dentro dos lotes ocorreu em todos da mesma maneira. O uso do inversor de frequência não influenciou na massa específica, assim como a temperatura e a velocidade do ar. Na Figura 34, pode-se observar a massa específica verde e seca dos lotes estudados.

TABELA 21. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE VERDE (MEAV), DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Programa	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão (g/cm <sup>3</sup> )	Coef. de variação (%)	Valores mín. / máx. (%)
70 2C	0,48	0,06	12,32	0,39 / 0,58
70 2V	0,47	0,06	12,72	0,37 / 0,59
70 4C	0,47	0,05	9,63	0,37 / 0,56
70 4V	0,48	0,05	9,94	0,39 / 0,56
90 2C	0,48	0,06	13,53	0,38 / 0,59
90 2V	0,48	0,06	12,12	0,39 / 0,54
90 4C	0,47	0,05	9,73	0,38 / 0,57
90 4V	0,47	0,05	10,32	0,38 / 0,57

Os valores da massa específica aparente seca estão de acordo com os encontrados por MUÑIZ (1993), os quais variaram de 0,42 a 0,52g/cm<sup>3</sup> e por TOMASELLI (1979) que encontrou um valor médio de 0,52 g/cm<sup>3</sup>. TOMASELLI (1981), não encontrou influência da temperatura sobre a massa específica das amostras quando utilizou temperaturas de secagem de 80, 90 e 100°C, encontrando somente influência da temperatura na massa específica em temperaturas acima de 100°C.

FIGURA 34. MASSA ESPECÍFICA APARENTE MÉDIA VERDE E SECA PARA OS PROGRAMAS DE *Pinus taeda*



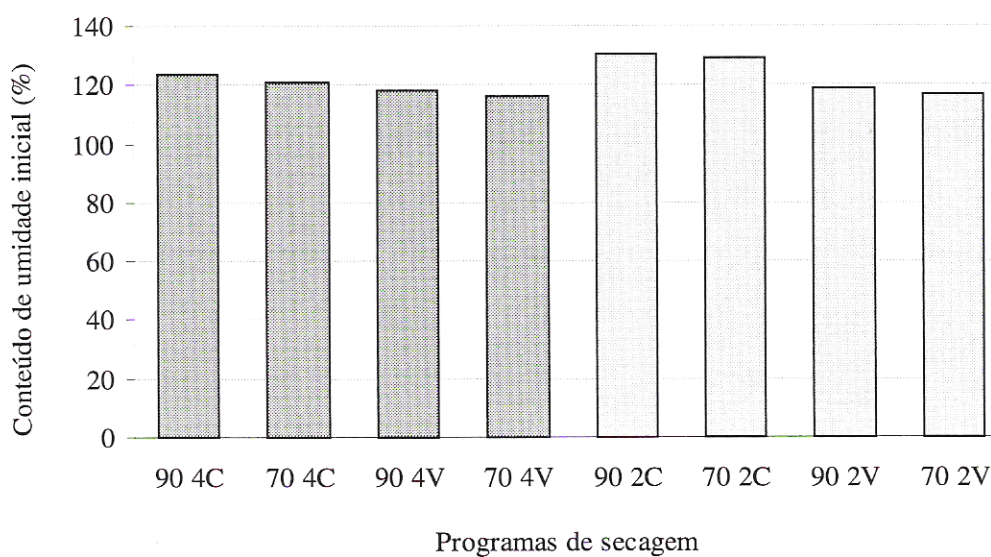
#### 4.4.2 Teor de umidade da madeira

##### 4.4.2.1 Teor de umidade inicial

Os valores médios encontrados para o teor de umidade inicial variaram na velocidade do ar de 4m/s de 123,37 a 115,91% e na velocidade de 2m/s os valores encontrados variaram de 130,16 a 118,60% (Tabela 22), ocorrendo uma tendência de perda da umidade inicial entre o primeiro e o quarto lote de cada velocidade (Figura 35). Os valores mínimos e máximos encontrados variaram de 81,2 para 166,0% na velocidade de 4m/s e de 75,6 para 169,0% na velocidade do ar de 2m/s, sendo considerada uma variação alta, mas que normalmente é encontrada e difícil de ser controlada, devido a grande variabilidade do material.

TABELA 22. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DO TEOR DE UMIDADE INICIAL, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Programa	Teor de umidade inicial (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)	Valores mín. / máx. (%)
90 4C	123,37	23,24	18,84	166,0 / 87,9
70 4C	121,17	18,39	15,18	156,6 / 85,7
90 4V	118,33	21,89	18,50	163,5 / 86,4
70 4V	115,91	22,36	19,43	160,3 / 81,2
90 2C	130,16	23,34	17,86	168,6 / 84,1
70 2C	126,97	24,28	19,13	169,0 / 85,8
90 2V	119,05	23,55	19,78	163,2 / 78,1
70 2V	118,60	22,38	18,87	163,3 / 75,6

FIGURA 35. DISTRIBUIÇÃO DO TEOR MÉDIO DE UMIDADE INICIAL OBTIDO ENTRE OS PROGRAMAS DE *Pinus taeda*.

Foi realizada uma análise estatística (Anexo 2) para verificar se os lotes apresentavam diferença no teor de umidade inicial. Como os lote ainda iriam sofrer a secagem, considerou-se cada lote um tratamento diferente. A análise comprovou que houve

diferença estatística ( $F = 1,99$   $\rho = 0,049$ ), entre pelo menos um dos lotes, aplicou-se o teste de comparação de médias (“Tukey”), concluindo que somente o lote com teor de umidade inicial igual a 115,9% foi estatisticamente diferente do lote com 130,1% e que os demais foram iguais estatisticamente entre si.

Com o intuito de minimizar tal efeito os lotes foram armazenados em câmara fria para posteriormente serem utilizados na secagem. Os resultados encontrados apesar de não fazerem parte do estudo evitou significativamente o desenvolvimento dos fungos e minimizou a perda de umidade inicial média dos lotes, permanecendo a variação dentro dos lotes. Apesar da diminuição do teor de umidade o armazenamento foi considerado eficiente, sendo recomendada a necessidade da embalagem e armazenamento do material em câmara fria, para serem posteriormente utilizados. Tais procedimentos foram recomendados por MILOTA e TSCHERNITZ (1990) e por SIMPSON (1997).

Antes de iniciar o processo de secagem, a madeira passa por um período de aquecimento que segundo JUNTA DE ACUERDO DE CARTAGENA (1989), o período de aquecimento da madeira normalmente é realizado em ambiente com elevada umidade relativa do ar para evitar sua secagem antes do aquecimento, causando reumidificação superficial da madeira e homogeneizando o teor de umidade inicial entre as peças na câmara.

Segundo MUÑIZ (1993) o teor de umidade inicial varia consideravelmente na árvore, sendo o principal fator o alto teor de umidade encontrada no lenho juvenil quando comparado com o lenho adulto, ocorrendo o inverso com a formação do cerne. A autora concluiu que o alto teor de extrativo associa-se a baixo teor de umidade e que a medida que a idade aumenta o teor de umidade inicial diminuí. CHOOG (1969), concluiu que somente pode-se compara teores de umidade com árvores de mesma idade, pois quanto maior a idade menor o teor de umidade.

Os valores do teor de umidade inicial obtidos neste estudo, assim como sua variação entre os valores máximos e mínimos, estão em conformidade com os encontrados valores por vários pesquisadores, ZADERENKO (2000), obteve umidade inicial para *Pinus taeda* que variando de 76,2 à 185,2%. MUÑIZ (1993), estudando a mesma espécie encontrou um teor de umidade inicial médio de 147,83% e MILOTA & TSCHERNITZ (1990), estudando a taxa de

secagem de *Pinus taeda* encontraram valores para o teor de umidade inicial que variaram de 90 à 180%, Segundo KOLLMANN & CÔTÉ (1968), velocidade de secagem de madeira serrada depende de vários fatores tais como entre eles o teor de umidade inicial, onde grandes variações entre os teores de umidade inicial para um mesmo teor de umidade final desejado podem afetar o tempo de secagem.

#### 4.4.2.2 Teor de umidade final

Os teores de umidade final médio da madeira foram obtidos pelo método de pesagem (Tabela 23) e variaram de 7,79 a 9,93% nos programas que utilizaram velocidade do ar de 4m/s e para velocidade do ar de 2m/s variaram de 8,09 a 8,65%. Os resultados encontrados apresentaram-se pouco abaixo do teor de umidade final desejado (10%), ocorreu uma tendência de aumento no teor de umidade final quando foi utilizado o inversor de frequência nos programas com velocidade de 4m/s (Figura 36). Os valores mínimos e máximos encontrados variaram de 6,66 a 12,89% na velocidade de 4m/s e de 6,06 a 11,72% na velocidade do ar de 2m/s. O teor de umidade final entre os lotes apresentaram uma baixa variação no entanto, dentro dos lotes ocorreu uma alta variação. O que já era esperado em função da variação encontrada no teor de umidade inicial dentro dos lotes.

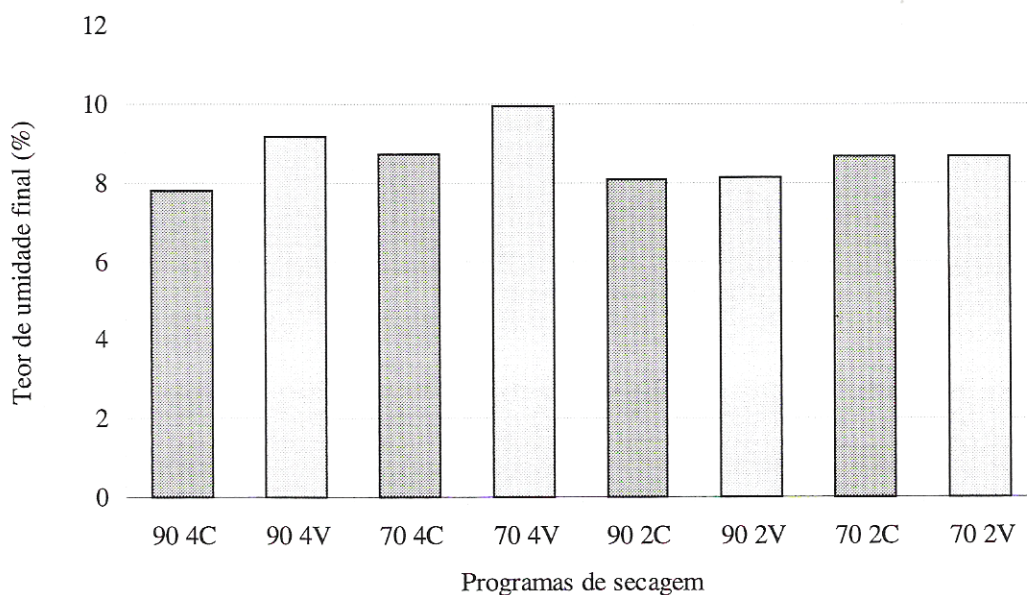
TABELA 23. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DO TEOR DE UMIDADE FINAL, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Programa	Teor de umidade final (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)	Valores mín. / máx. (%)
90 4C	7,79	0,94	12,07	6,66 / 10,21
70 4C	8,72	0,68	7,85	7,82 / 10,36
90 4V	9,18	1,08	11,77	7,91 / 11,90
70 4V	9,93	1,33	13,40	7,81 / 12,89
90 2C	8,09	1,00	12,39	6,93 / 10,95
70 2C	8,65	0,62	7,22	7,77 / 11,30
90 2V	8,12	0,77	10,46	6,06 / 9,44
70 2V	8,65	0,92	10,67	7,34 / 11,72

Foi realizada uma análise de variância (Anexo 5) comprovou haver influência altamente significativa dos fatores no teor de umidade final. Os fatores temperatura, velocidade do ar, inversor de frequência e ainda da interação velocidade do e inversor de frequência afetaram o teor de umidade final.

A variação no teor de umidade final dentro do lote normalmente ocorre, SANTINI (1996) secando *Pinus elliottii*, conseguiu valores de teor de umidade final médio variando de 9,8 a 10,0%. SALAMON E MCINTYRE (1969), buscando atingir na secagem 15% de umidade final encontraram valores variando de 14,2 a 18,7%, SALAMON (1973), procurando atingir 12% de teor de umidade final obteve resultados variando 7,6 a 17,4% com um desvio padrão de 2,05% e TAYLOR & LANDOCH (1990), estudando *Pinus elliottii*, obtiveram resultados variando de 10,2 a 20,0% procurando atingir 12% na média. Portanto, a variação no teor de umidade final dentro dos lotes neste estudo foi considerada pequena quando comparada com as variações encontradas na literatura, esta variação deve-se pela falta de equalização do teor de umidade entre as peças no final do processo de secagem.

FIGURA 36. DISTRIBUIÇÃO DO TEOR UMIDADE FINAL ENCONTRADA ENTRE OS PROGRAMAS DE SECAGEM DE *Pinus taeda*





O inversor de frequência influenciou com a redução da velocidade do ar e o teor de umidade final nos programas de secagem. Como a velocidade do ar exerce considerável influência na transferência de calor à superfície da madeira e na transferência de massa de vapor d'água da superfície para o meio secante (HILDEBRAND, 1970). Com a redução da velocidade do ar durante as fases da secagem utilizando o inversor de frequência foi reduzida a taxa de transferência de massa para o meio secante contribuindo provavelmente na elevação do teor de umidade final da madeira.

A elevação no teor de umidade para os programas que utilizaram o inversor apesar de estatisticamente significativa não foi muito elevada. Os programas que utilizaram velocidade constante apresentaram uma média de 8,3% e os programas que utilizaram velocidade do ar variável foi de 8,7%. A maior influência no teor de umidade final foi causada pela temperatura, na temperatura de 90°C a umidade final foi igual a 8,0% e na temperatura de 70°C foi de 9,0%, considera também apesar de significativa não afetar o processo, visto que o teor de umidade final desejado foi de 10%.

#### 4.4.3 Análise de regressão do teor de umidade por pesagem

Aplicou-se matriz de correlação entre as variáveis estudadas, sendo escolhida para realizar a análise de regressão as variáveis de interesse. Com relação ao teor de umidade considerou o tempo e o consumo de energia na análise (Tabela 24).

- 3) Teor de umidade por pesagem (TUP) com Tempo de secagem (T);
- 4) Teor de umidade por pesagem (TUP) com o consumo de energia (WH).

TABELA 24. CORELAÇÕES ENCONTRADAS ENTRE TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM E O TEMPO E ENTRE O CONSUMO DE ENERGIA NOS PROGRAMAS

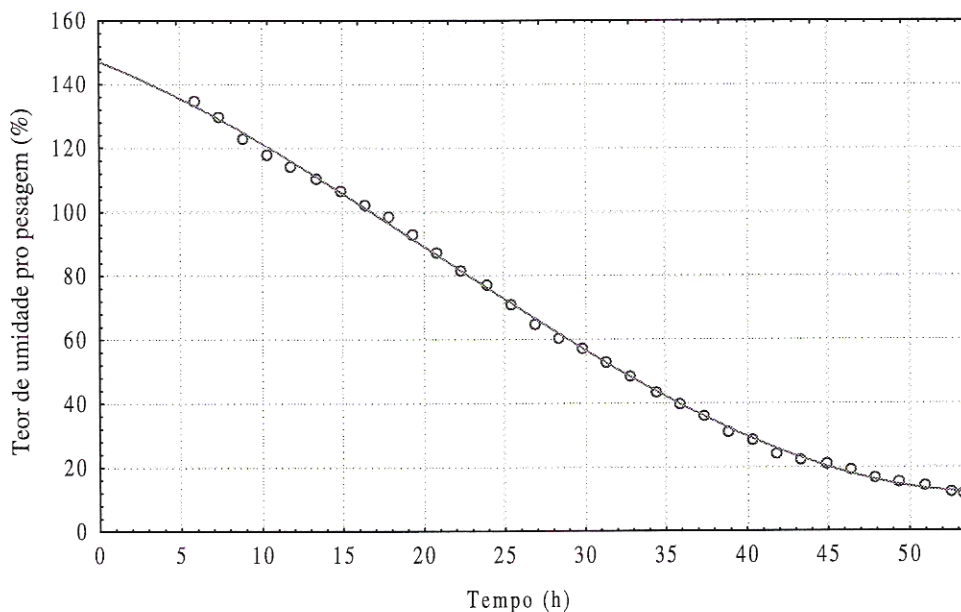
Variáveis	TAXA DE SECAGEM (kgU/h)							
	70 2C	70 2V	70 4C	70 4V	90 2C	90 2V	90 4C	90 4V
1) T	-0,98	-0,98	-0,99	-0,98	-0,99	-0,99	-0,99	-0,99
2) WH	-0,97	-0,98	-0,99	-0,98	-0,99	-0,99	-0,99	-0,99

Pode-se observar na Tabela 24, que as variáveis analisadas apresentaram alta correlação. O teor de umidade por pesagem (TUP) apresenta uma correlação inversa com o tempo (T) e com o consumo de energia (WH) Aplicou-se os modelos em função da tendência observada dos dados. Devido as altas correlações existente entre as variáveis foi escolhida uma de cada variável entre os programas para apresentação da análise de regressão. Inicialmente foi analisada a correlação entre o teor de umidade por pesagem (TUP) e o tempo (T).

Foi escolhido o programa 90 4V (-0,99), observado a dispersão dos dados (Anexo 36) optou-se pela escolha de um modelo polinomial de terceira ordem decrescente ( $y = a - b*x + c*x^2 + d*x^3$ ). O modelo ajustado apresentou Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) igual a 0,99, Erro Padrão da Estimativa porcento ( $S_{yx}\%$ ) igual a 1,88% e valor de "F" da regressão igual a 13468, indicando que o mesmo estima o teor de umidade em função do tempo com bom grau de precisão. Os coeficientes da regressão gerada apresentaram-se altamente significativos, justificando suas presenças no modelo. Na Figura 37 observa-se a aplicação do modelo proposto para o teor de umidade em função do tempo. A equação gerada em função da análise de regressão foi a seguinte:

$$TUP = 147,1656 - 2,0643*T - 0,0611*T^2 + 0,001*T^3$$

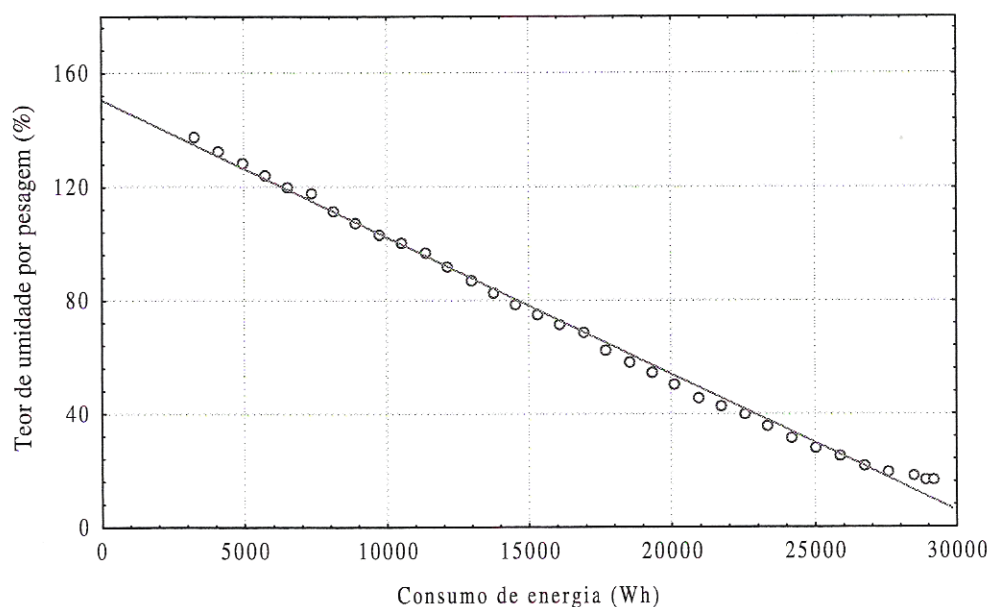
FIGURA 37. REGRESSÃO POLINOMIAL DECRESCENTE AJUSTADAS PARA ESTIMAR O TEOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM



Para a correlação entre o teor de umidade por pesagem (TU) com o consumo de energia (Wh) foi escolhido o programa 90 4C (-0,99), observado a dispersão dos dados (Anexo 42) optou-se pela escolha de um modelo linear decrescente ( $y = a - b \cdot x$ ). O modelo ajustado apresentou Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) igual a 0,99, Erro Padrão da Estimativa por cento ( $S_{yx}\%$ ) igual a 1,19% e valor de "F" da regressão igual a 6869, indicando que o mesmo estima o teor de umidade em função do tempo com bom grau de precisão. Os coeficientes da regressão gerada apresentaram-se altamente significativos, justificando suas presenças no modelo. Na Figura 38, observa-se a aplicação do modelo proposto para o teor de umidade em função do consumo de energia. A equação gerada em função da aplicação da análise de regressão foi a seguinte:

$$TUP = 150,6478 - 0,0048 \cdot (WH)$$

FIGURA 38. REGRESSÃO LINEAR DECRESCENTE AJUSTADA PARA ESTIMAR O TEOR DE UMIDADE FUNÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA



Pode-se observar que os modelos propostos para estimar o teor de umidade em função do tempo e em função do consumo de energia apresentaram altamente significativos. Portanto pode-se estimar o teor de umidade em função do tempo ou em função do consumo

de energia com boa precisão dentro da condição apresentada.

#### 4.4.4 Efeito na contração

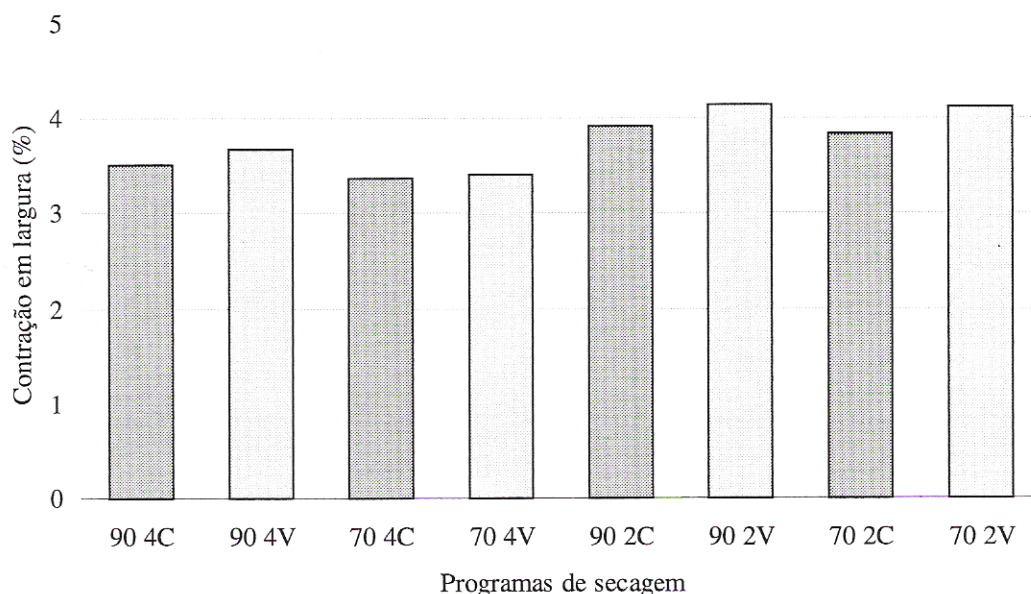
##### 4.4.4.1 Contração em largura

A contração em largura média da madeira (Tabela 25) variaram de 3,37 a 3,68% nos programas que utilizaram velocidade do ar de 4m/s e para velocidade do ar de 2m/s variaram de 3,84 a 4,14%. Pode-se observar que o inversor de frequência afetou a contração em largura levemente em todos os programas e que a velocidade de 2m/s também apresentou contrações levemente superiores quando comparou-se com as contrações na velocidade de 4m/s (Figura 39). Os valores mínimos e máximos encontrados variaram de 1,08 a 5,89% na velocidade de 4m/s e de 0,84 para 5,98% na velocidade do ar de 2m/s. A contração em largura entre os lotes apresentaram uma baixa variação no entanto, dentro dos lotes ocorreu uma alta variabilidade causada basicamente pela complexidade da estrutura da madeira.

TABELA 25. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DA CONTRAÇÃO EM LARGURA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Programa	Contração em largura (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)	Valores mín. / máx. (%)
90 4C	3,52	0,94	26,60	1,63 / 5,45
70 4C	3,37	1,02	30,33	1,77 / 5,31
90 4V	3,68	1,10	29,82	1,08 / 5,58
70 4V	3,41	1,17	34,27	1,09 / 5,89
90 2C	3,93	0,84	21,40	2,04 / 5,53
70 2C	3,84	1,14	29,70	0,84 / 5,43
90 2V	4,14	1,12	27,01	1,49 / 5,98
70 2V	4,12	1,05	25,53	2,15 / 5,82

FIGURA 39. CONTRAÇÃO MÉDIA EM LARGURA OBTIDA PARA OS PROGRAMAS DE SECAGEM DE *Pinus taeda*



A análise de variância (Anexo 9) comprovou haver influência altamente significativa somente do fator temperatura sobre a contração em largura. Apesar do inversor de frequência apresentar uma diferença visual entre os lotes, somente a temperatura afetou significativamente a contração em largura da madeira. A temperatura de 90 °C apresentou uma contração média em largura de 3,5% e a temperatura de 70°C causou uma contração em largura de 4,0%. Portanto a maior contração média em largura foi obtida na temperatura de 70°C. Semelhante resultado foi encontrado por TOMASELLI (1981). ARAYA & HERNADEZ (1993) obtiveram contração média na largura de 4,05% com um desvio padrão de 0,8% e PRICE & KOCH (1980), estudando algumas espécies de *Pinus*, encontraram uma contração média em largura de 3,5%. Os resultados citados estão próximos aos encontrados neste estudo.

#### 4.4.4.2 Contração em espessura

A contração em espessura média da madeira (Tabela 26) variaram de 3,87 a 4,36% nos programas que utilizaram velocidade do ar de 4m/s e para velocidade do ar de 2m/s

variaram de 3,81 a 4,01%. Pode-se observar que não houve nenhuma tendência dos dados, quanto a contração em espessura (Figura 40).

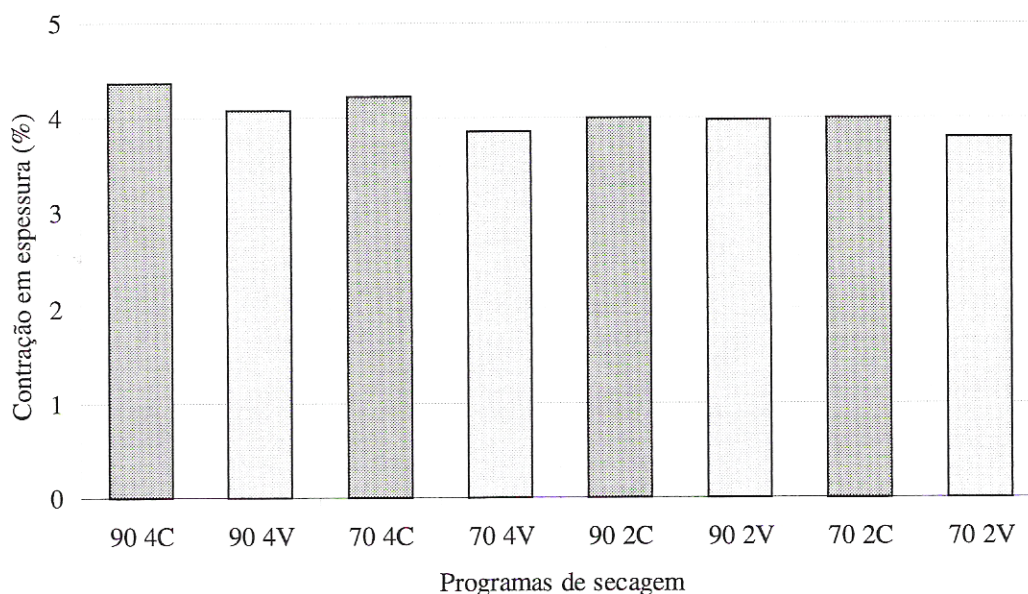
TABELA 26. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DA CONTRAÇÃO EM ESPESSURA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Programa	Contração em espessura (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)	Valores mín. / máx. (%)
90 4C	4,36	0,73	16,57	3,00 / 5,88
70 4C	4,09	0,78	19,03	2,67 / 5,99
90 4V	4,24	0,77	18,16	2,35 / 6,28
70 4V	3,83	0,67	17,51	2,20 / 4,88
90 2C	4,01	0,94	23,69	2,49 / 6,40
70 2C	3,86	0,80	20,75	2,52 / 5,50
90 2V	3,99	0,90	22,61	2,13 / 6,28
70 2V	3,81	0,79	20,64	2,37 / 5,84

Os valores mínimos e máximos encontrados variaram de 2,20 a 6,28% na velocidade de 4m/s e de 2,13 para 6,40% na velocidade do ar de 2m/s. A contração média em espessura entre os lotes apresentaram uma pequena variação no entanto, dentro dos lotes ocorreu uma alta variabilidade, pode-se observar que as contrações em espessura quando comparadas com as contrações em largura foram superiores em seus mínimos e máximos observados em todos os lotes.

A análise de variância (Anexo 11) comprovou haver influência significativa somente do fator temperatura sobre a contração em espessura, somente a temperatura afetou significativamente a contração em espessura da madeira. A temperatura de 90 °C apresentou uma contração média em largura de 4,2% e a temperatura de 70°C causou uma contração em largura de 3,9%. Portanto a maior contração média em largura foi obtida na temperatura de 90°C. ARAYA & HERNADEZ (1993) encontraram valores médios de 2,9% com um desvio padrão de 0,5%. TOMASELLI (1981) encontrou valores da contração em espessura para secagem de *P. elliotii* que variaram de 2,85 e 2,55%, nas temperatura de 80 e 90°C respectivamente.

FIGURA 40. CONTRAÇÃO MÉDIA EM ESPESSURA OBTIDA PARA OS PROGRAMAS DE SECAGEM DE *Pinus taeda*



Segundo HANN (1965), independente da orientação (radial ou tangencial) a contração é maior na espessura do que na largura somente quando aplicada temperatura acima de 60°C. Semelhantes resultados foram encontrados por SANTINI (1980). Segundo HANN (1965), a contração em espessura é maior porque as células da superfície são restringidas a contraírem na largura pelas células do interior (que ainda se encontram acima do ponto de saturação das fibras), enquanto que podem contrair livremente em espessura. Os resultados obtidos neste estudo, mostraram que a contração em espessura foi superior que a em largura, estando de acordo com a literatura citada.

#### 4.4.5 Gradiente do teor de umidade (G.U.)

O gradiente de umidade médio (Tabela 27) variou de 0,15 a 0,87% nos programas que utilizaram velocidade do ar de 4m/s e para velocidade do ar de 2m/s variaram de 0,20 a 0,61%. Pode-se observar que houve uma tendência nos dados quando foi utilizado o inversor e frequência em reduzir o gradiente de umidade, somente na temperatura de 70°C na

velocidade de 2m/s que o gradiente de umidade apresentou pequeno aumento com uso do inversor (Figura 41). Os valores mínimos e máximos encontrados variaram de -0,28 a 2,08% na velocidade de 4m/s e de -0,31 para 2,13% na velocidade do ar de 2m/s.

TABELA 27. VALORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DA GRADIENTE DE UMIDADE, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Programa	Gradiente de umidade (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)	Valores mín. / máx. (%)
90 4C	0,87	0,54	89,50	-0,15 / 1,82
70 4C	0,76	0,43	282,68	-0,28 / 1,02
90 4V	0,47	0,51	106,94	-0,19 / 1,46
70 4V	0,15	0,66	59,11	-0,17 / 2,08
90 2C	0,61	0,65	75,09	-0,02 / 2,13
70 2C	0,29	0,57	195,68	-0,31 / 2,07
90 2V	0,20	0,48	240,12	-0,29 / 1,09
70 2V	0,52	0,67	128,80	-0,30 / 2,09

A análise de variância em fatorial (Anexo 15) comprovou haver influência altamente significativa da interação dos fatores velocidade do ar com temperatura e temperatura com inversor de frequência sobre o gradiente de umidade. Pode-se observar na Figura 41, que quando foi reduzida a velocidade do ar de 4 para 2m/s (constantes) e quando abaixou-se a temperatura de 90 para 70°C nos programas estudados os gradientes de umidade foram reduzindo comprovando a influência destas variáveis no mesmo. Segundo GALVÃO & JANKOWSKI (1985), o gradiente de umidade é influenciado diretamente pela permeabilidade da madeira e pelo tempo de secagem, normalmente madeira mais permeáveis apresentam menores gradientes que às menos permeáveis.

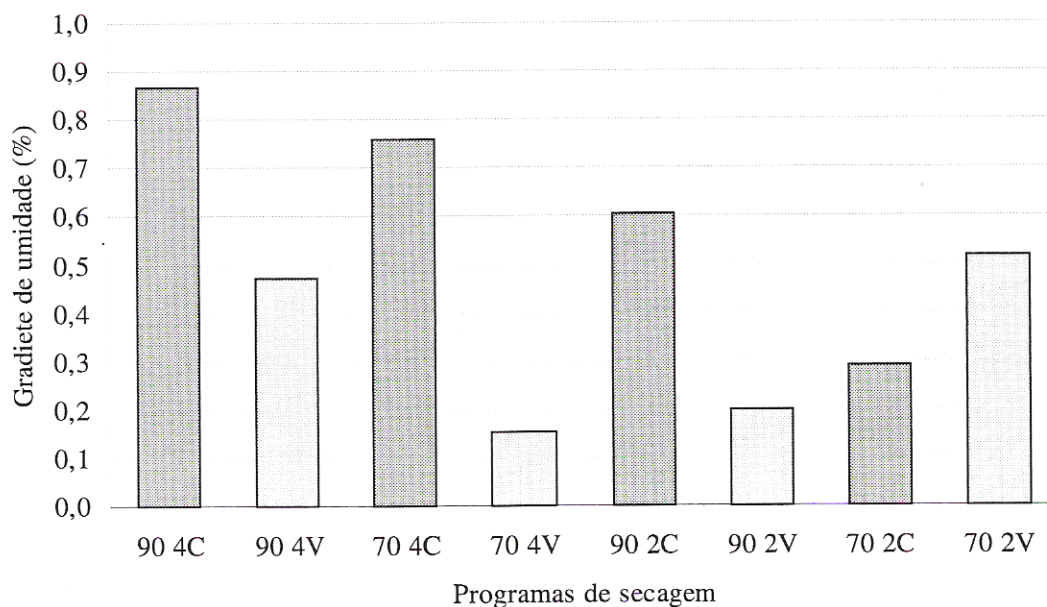
O gradiente de umidade apresentou uma grande variação tanto entre como dentro dos lotes. Todos os lotes apresentaram valores negativos para os mínimos mostrando que o acondicionamento aplicado após a secagem foi acima do necessário, enquanto que nos máximos os valores chegaram a atingir 2% de gradiente, significando a necessidade de mais acondicionamento, ficando portanto difícil conseguir minimizar tal condição em função da variabilidade encontrada principalmente com relação teor de umidade inicial da madeira. No entanto quando foi utilizado o inversor de frequência para reduzindo a velocidade do ar



durante o processo, ocorreu uma redução aparente no gradiente de umidade, o qual, influenciou na taxa de difusão da água higroscópica do interior para a superfície de maneira proporcionando um gradiente de umidade menor. Esta redução demonstra que o inversor frequência favoreceu o processo de secagem quanto a distribuição do teor de umidade no interior da madeira.

ARAYA & HERNANDEZ (1993), encontraram gradiente de umidade médio de 1,77% (desvio padrão de 1,19%) na secagem de *P. radiata* com 38mm de espessura nominal. WILLIAMS & KININMONTH (1986), na secagem da mesma espécie 50mm de espessura, encontraram valor médio de 4% para o gradiente de teor de umidade. Segundo os autores quanto maior a espessura da madeira maior o gradiente de umidade encontrado. Os resultados encontrados para o gradiente de umidade estão de acordo com os da literatura.

FIGURA 41. GRADIENTE MÉDIO DE UMIDADE OBTIDA PARA OS PROGRAMAS ESTUDADOS



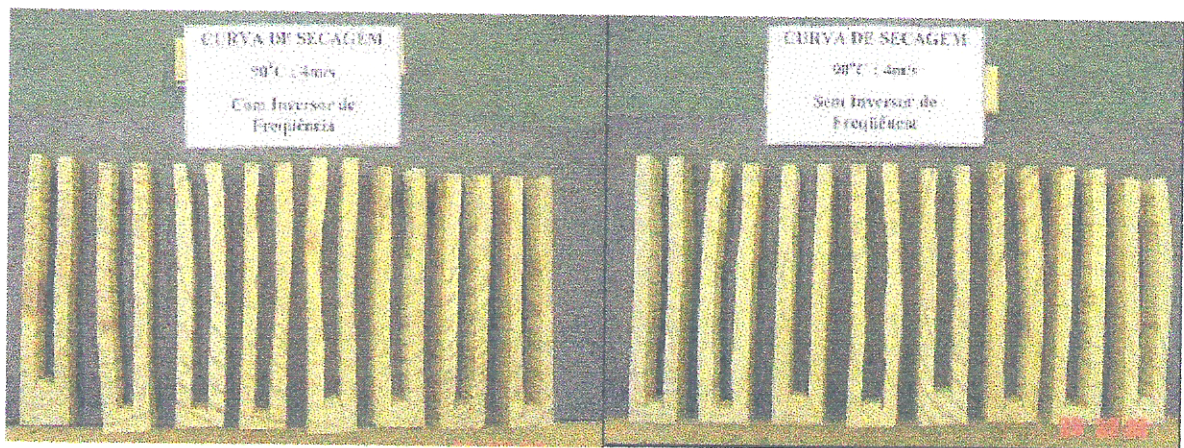
#### 4.4.6 Tensões internas

Na Figura 42, são apresentadas os testes de garfo realizados nos programas considerados mais severos por utilizarem a maior temperatura (90°C) e a maior velocidade do

ar (4ms) constante e variável. Pode-se observar na Figura 42, que os testes realizados mostrou que praticamente todas as amostras ficaram livres de tensões internas, indicando que o tempo fornecido no acondicionamento foi suficiente, apenas algumas peças ainda apresentaram pouca tensão interna, indicando a necessidade de mais acondicionamento.

Em função das condições apresentadas pode-se dizer que quando foi aplicado o inversor de frequência na secagem da madeira não houve influência nas tensões internas observadas e que o tempo de 6 horas aplicado no acondicionamento foi suficiente.

FIGURA 42. AVALIAÇÃO DAS TENSÕES INTERNAS ENTRE PROGRAMAS DE *Pinus taeda* (TESTE DO GARFO)



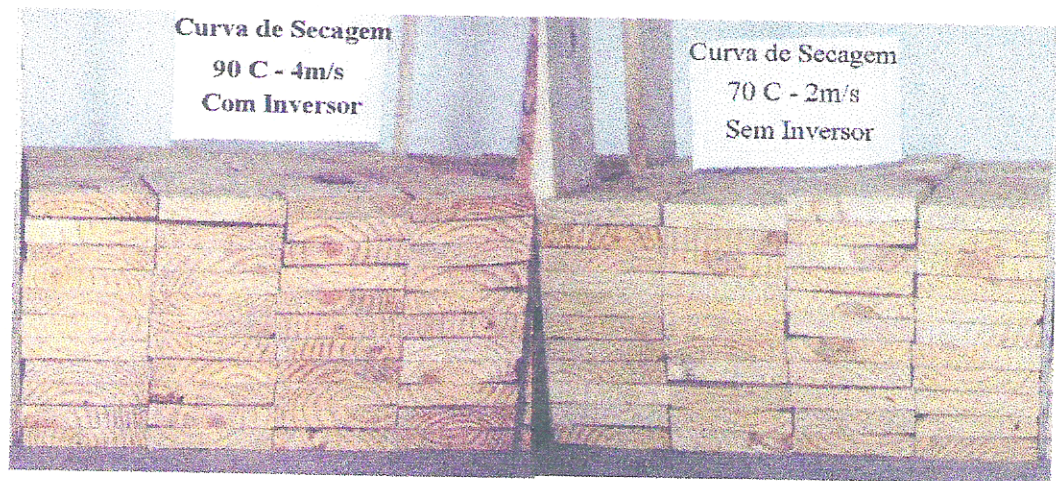
ZADERENKO (2000) utilizando *Pinus taeda* em seu estudo encontrou ligeiro endurecimento superficial realizando teste de garfo, indicando mais uma hora de acondicionamento. FULLER (1995) menciona que o teste de garfo tem sido por décadas utilizado para determinar o grau de alívio das tensões e não se tem efetivamente um método padrão para apresentar seus resultados, sendo avaliado normalmente apenas visualmente.

#### 4.4.7 Coloração e mancha marrom na madeira

A madeira após a secagem apresentou um escurecimento superficial com a elevação da temperatura e da velocidade do ar. As curvas que utilizaram temperatura de 70°C com velocidade do ar de 2m/s (variável) apresentaram uma coloração amarelo palha característico

da madeira que segundo a classificação de MUNSELL, apresentou uma coloração 2,5Y 8/6. Para as curvas que utilizaram 90°C e uma velocidade de 4m/s (constante) apresentaram uma coloração amarelo avermelhado sendo classificada segundo a norma como 7,5YR 7/6 (Figura 43). Após aplainamento superficial de 2mm das peças, não foi observado diferença entre os programas com relação a coloração, não afetando portanto a qualidade da madeira.

FIGURA 43. AVALIAÇÃO DA COLORAÇÃO SUPERFICIAL DAS PEÇAS UTILIZADAS NOS PROGRAMAS (90 4C E 70 2V)



a) Programa 90 4V

Programa 70 2C

As variações das colorações mais clara e a mais escura observadas entre os programas, correspondem ao programa mais suave em termos de temperatura e velocidade do ar e o programa mais drástico. A condição mais drástica de secagem causou maior escurecimento superficial da madeira. A redução da velocidade do ar com o uso do inversor de frequência colaborou minimizando o escurecimento superficial da madeira por reduzir a transferência de calor a superfície da mesma.

Para SHNEIDER, (1972) e TOMASELLI (1977) a intensidade da mudança da coloração da superfície da madeira é diretamente proporcional a temperatura de secagem e inversamente com o teor de umidade final. Para TOMASELLI (1981), a madeira apresenta

escurecimento superficial com aumento da temperatura de secagem. A intensidade deste escurecimento foi mais acentuada com o aumento da temperatura nas amostras com menor teor de umidade final. Para SEVERO (1986) a mudança da tonalidade externa da madeira, e a exudação de resina não afetaram a qualidade do material, por ser removido com aplainamento de 1mm. MUÑIZ (1993) caracterizando a madeira de *Pinus taeda*, analisando o efeito da temperatura na coloração, constatou uma mudança da cor natural passando para uma tonalidade amarelada em temperatura entre 20 e 50°C, enquanto que a madeira, proveniente dos tratamentos onde foram testadas temperatura de 80 e 120°C, apresentou escurecimento superficial.

Os resultados apresentados com relação a coloração superficial estão de acordo com os encontrados na literatura, quanto a influência da temperatura e da velocidade do ar na mudança da coloração superficial da madeira.

Com relação a mancha marrom pode-se observar na Figura 44, a influência das variáveis estudadas na formação da mancha marrom na madeira de *Pinus taeda*. Assim como na coloração da superfície da madeira, na mancha marrom ocorreu uma variação semelhante na intensidade da mancha entre os programas.

Após o aplainamento de 1mm da espessura da madeira no programa mais lento, temperatura de 70°C com 2m/s (variável), observou-se pouca intensidade de mancha apresentando uma coloração amarelo levemente escuro, no programa mais rápido, temperatura de 90°C em 4m/s (constantes), ocorreu uma intensidade forte da mancha apresentando uma coloração praticamente marrom. PEREIRA (1992), estudando a formação e controle da mancha marrom na madeira serrada concluiu que a coloração da madeira evoluiu de amarelo-pálida, a 50°C, para marrom escura, a 110°C. Da mesma maneira TOMASELLI (1988), relatou a ocorrência da mancha marrom em *Pinus taeda* e *P. elliottii*, observando que a coloração natural, obtida a 50°C, alterava-se para amarela e marrom quando a secagem era conduzida a 60°C e a 120°C, respectivamente. estando de acordo com os resultados encontrados na literatura.

O uso do inversor de frequência minimizou a formação da mancha marrom na madeira com a redução da velocidade do ar durante as fases da secagem, por reduzir a transferência de calor a superfície da madeira.

FIGURA 44. AVALIAÇÃO DA MANCHA MARROM NOS PROGRAMAS DE SECAGEM DE *Pinus taeda*



a) 90°C 4m/s (constante)

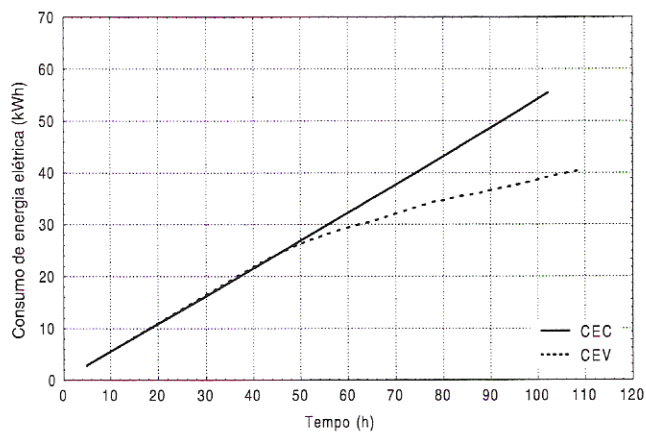
b) 70°C 2m/s (variável)

#### 4.5 INVERSOR DE FREQUÊNCIA E SEUS IMPACTOS NA SECAGEM DA MADEIRA

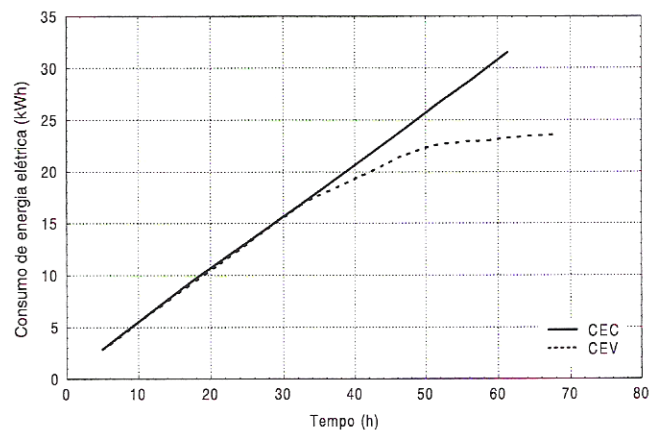
##### 4.5.1 Influência no consumo de energia elétrica

Pode-se observar nas Figuras 45 e 46, as curvas de consumo de energia elétrica obtidos nas temperaturas de 70 e 90°C, na velocidade do ar de 2m/s, e as curvas nas temperaturas de 70 e 90°C na velocidade de 4m/s respectivamente.

FIGURA 45. CURVAS DE ENERGIA CONSUMIDA PARA VELOCIDADE DO AR DE 2m/s NAS TEMPERATURAS DE 90 E 70°C COM E SEM O USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

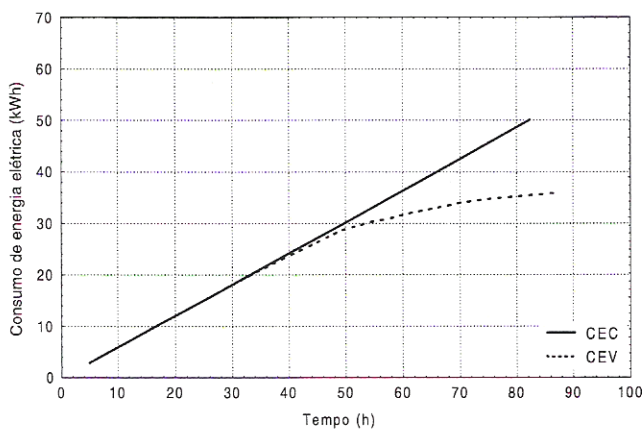


Curva: 2m/s; 70°C

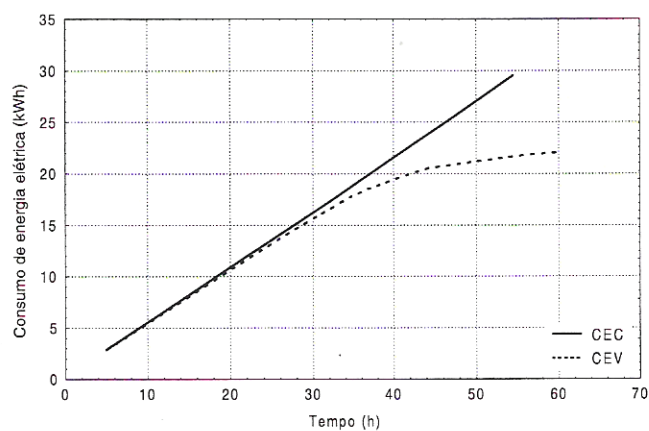


Curva: 2m/s; 90°C

FIGURA 46. CURVAS DE ENERGIA CONSUMIDA PARA VELOCIDADE DO AR DE 4m/s NAS TEMPERATURAS DE 90 E 70°C COM E SEM O USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA



Curva: 4m/s; 70°C



Curva: 4m/s; 90°C

Onde:

CEC = Energia elétrica consumida com velocidade constante;

CEV = Energia elétrica consumida com velocidade variável.

As curvas de consumo de energia elétrica apresentaram inclinações semelhantes em todos os programas, variando somente o tempo entre elas. Para melhor interpretação das mesmas, calculou-se o consumo de energia elétrica por hora em função do consumo e do tempo de permanência em cada faixa de umidade para cada programa (Tabela 28).

TABELA 28. CONSUMO DE ENERGIA(kWh), TEMPO (h) E CONSUMO DE ENERGIA POR HORA (kWh/h) EM CADA FAIXA DE UMIDADE PARA CADA PROGRAMA

Faixa de umidade (%)	CONSUMO DE ENERGIA (kWh)							
	70 2C	70 2V	70 4C	70 4V	90 2C	90 2V	90 4C	90 4V
1) verde - 80	13,80	16,54	14,45	14,02	11,38	10,68	9,58	11,05
2) 80 – 50	11,12	9,02	10,33	11,14	6,11	6,01	4,99	5,28
3) 50 – 30	7,18	5,49	9,54	6,20	4,51	3,61	1,84	2,53
4) 30 – 20	4,69	2,04	5,46	2,60	3,19	0,78	4,50	0,70
5) 20 – 10	15,23	3,94	7,98	1,24	5,17	1,64	5,66	1,26
Faixa de umidade (%)	TEMPO EM HORAS							
	70 2C	70 2V	70 4C	70 4V	90 2C	90 2V	90 4C	90 4V
1) verde - 80	25,87	30,67	23,67	25,10	21,20	20,93	17,93	21,37
2) 80 – 50	21,06	18,40	17,16	18,37	11,60	11,82	9,44	10,73
3) 50 – 30	13,10	19,88	15,74	15,1	8,50	10,70	3,43	8,07
4) 30 – 20	8,67	8,95	8,8	10,1	5,80	6,50	8,33	4,93
5) 20 – 10	27,47	23,87	12,63	11,9	9,53	11,80	10,37	9,13
Faixa de umidade (%)	CONSUMO DE ENERGIA POR HORA (kWh/h)							
	70 2C	70 2V	70 4C	70 4V	90 2C	90 2V	90 4C	90 4V
1) verde - 80	0,53	0,53	0,61	0,56	0,53	0,51	0,53	0,52
2) 80 – 50	0,52	0,49	0,60	0,60	0,52	0,50	0,52	0,49
3) 50 – 30	0,54	0,27	0,60	0,41	0,53	0,33	0,53	0,31
4) 30 – 20	0,55	0,22	0,62	0,25	0,55	0,12	0,54	0,14
5) 20 – 10	0,54	0,16	0,63	0,10	0,54	0,13	0,54	0,13

Analisando o efeito do consumo de energia dentro dos programas, verificou-se que todos tiveram a mesma tendência de reduzirem o consumo de energia da primeira faixa para a quarta faixa de umidade. Na quinta faixa de umidade (20 até 10%), todos os programas apresentaram consumo de energia elétrica superior a anterior. Este aumento no consumo se

deve principalmente pelo aumento no tempo, ocasionado pela dificuldade da retirada d'água higroscópica localizada na parede celular da madeira. Ou seja, na quinta faixa de umidade o processo físico de retirada da água do interior da madeira para a superfície ocorre basicamente por difusão.

Segundo HART (1966), no processo de difusão as moléculas d'água movem-se através da parede celular por um gradiente de umidade e por um gradiente de pressão de vapor, necessitando de maior quantidade de energia Para STAMM (1962), o processo de difusão é considerado extremamente complexo sendo afetado pela temperatura, permeabilidade e massa específica da madeira. BROWN & BETHEL (1975), concluíram que a velocidade com que ocorre a difusão do interior para a superfície afeta diretamente a velocidade de secagem.

Pode-se observar que o consumo de energia elétrica entre os programas foram influenciados inversamente pela temperatura. No programa de 70°C com velocidades do ar de 2 e 4m/s constante e variável, apresentaram maior consumo de energia elétrico em todas as faixas de teor de umidade, quando comparou-se com os programas de 90°C nas velocidades do ar de 2 e 4m/s constante e variável. A temperatura de secagem afeta inversamente a taxa de secagem da madeira. TOMASELLI (1981); SANTINI (1980); SEVERO (1986); CECH & PFAFF (1977), afirmam que o aumento da temperatura reduz consideravelmente o tempo de secagem, teor de umidade de equilíbrio e consumo de energia. Para KOLLMANN & CÔTÉ (1968), quanto maior a temperatura maior a velocidade de secagem, dependendo da quantidade de energia fornecida por unidade de tempo, como da capacidade do ar em adsorver umidade.

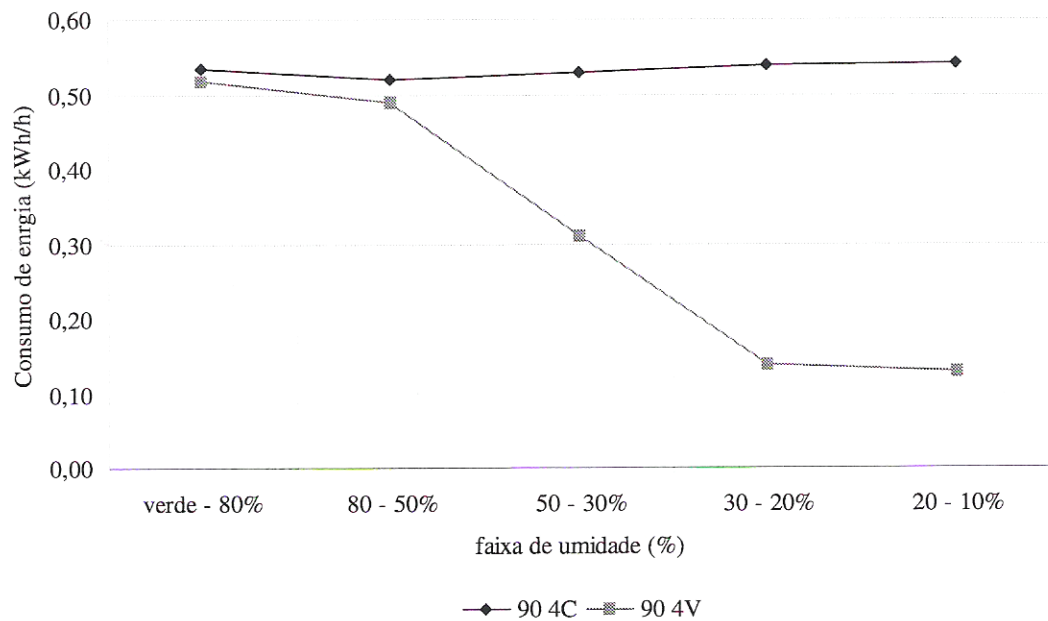
Quando foi desconsiderado a variação do tempo no consumo de energia elétrica (Tabela 28), verificou-se que os programas que utilizaram velocidade do ar constante apresentaram consumo de energia praticamente iguais ao longo das faixas de umidade. Este fenômeno já era esperado, visto que, o ventilador funcionou todo tempo com velocidade constante, apresentando um consumo linear ao longo do tempo, como pode ser observado nas Figuras 45 e 46 as curvas de consumo de energia com velocidade do ar constante.

No entanto, os programas que utilizaram velocidade do ar variável apresentaram uma tendência de redução no consumo de energia elétrica por hora a partir da segunda faixa de





FIGURA 48. INCREMENTO NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA (kWh) PARA OS PROGRAMAS COM TEMPERATURA DE 90<sup>o</sup>C COM VELOCIDADE DO AR DE 4m/s CONSTANTE E VARIÁVEL, NAS DIFRENTES FAIXAS DE UMIDADE



Na Tabela 29, pode-se observar que o consumo total de energia elétrica (kWh) nos programas que utilizaram velocidade do ar constante, foram sempre maiores quando comparados com o uso de velocidade variável. A influência da temperatura, da velocidade do ar e do uso do inversor de frequência foi aparente entre os programas (Figura 49). Porém, quando os valores de consumo total de energia (kWh), foram transformados em consumo de energia por hora (kWh/h), eliminando a influência da variável tempo, observou-se que somente o inversor de frequência afetou todos os programas no consumo de energia elétrica durante o processo de secagem da madeira.



de energia elétrica gasta pelo ventilador no processo de secagem 0,548kW/h, estando estes resultados muito próximo dos valores encontrados neste estudo quando foi utilizado a velocidade do ar constante.

O efeito do inversor de frequência no consumo de energia elétrica, propiciou praticamente a mesma redução no consumo de energia em todos os programas. A redução no consumo de energia foi em média 31,9%. Segundo RAMOS (2001), os inversores de frequência têm grande potencial de economia, principalmente na aplicação em ventiladores e bombas. A economia no consumo de energia pode variar de 30 à 50%.

No entanto, os tempos de secagem foram maiores com o uso do inversor, em média 9% para os programas que utilizaram 90°C e 5,5% nos programas que utilizaram 70°C. Este aumento no tempo de secagem afetam a produtividade de madeira seca por período (mês, ano). Os aumentos de tempo encontrados neste estudo podem ser considerados não excessivos, estando de acordo com SCHMIDT (1984).

VRANIZAN & WOHLGEMUTH (1988), conseguiram redução média no consumo de energia elétrica de 39,2%. CULPEPER (1990), aplicando redução da vazão de ar no processo de secagem da madeira conseguiu uma redução total de 45% no consumo de energia elétrica consumida pelos ventiladores. SIMPSON (1997), cita que modestas reduções na velocidade do ar na secagem da madeira causam grandes reduções de energia, podendo chegar a 50%. BRUNNER & HILDEBRAND (1987), utilizando regulação da velocidade do ar obtiveram grandes reduções no consumo de energia chegando a 51% em coníferas.

Os autores acima citados obtiveram maior redução no consumo de energia elétrica utilizando variação da velocidade do ar durante todo o processo de secagem da madeira, que se divide em aquecimento, secagem e acondicionamento, o que diferencia o presente estudo que avaliou somente a secagem da madeira.

As vantagens demonstradas neste estudo comprovam que o inversor de frequência é um equipamento necessário na indústria madeireira, principalmente na secagem da madeira, onde a potência instalada é elevada. A conservação de energia pode ser otimizado se for implementado a redução da vazão constantemente ao longo do processo e não na forma de rampa como foi aplicado neste estudo. No início do processo pelos cálculos de vazão mínima

na primeira e as vezes na segunda fase foi solicitada uma vazão maior que a possibilidade do motor. O teor de umidade utilizado para controle do processo foi pelo método resistivo, utilizando cabos com pinos sensores cravados na madeira, é recomendado determinar o teor de umidade por pesagem por apresentar maior precisão.

Segundo MASTERSAVE (1998), quando o inversor de frequência for ligado ao motor do ventilador mesmo que a vazão seja mantida constante, obtém-se uma redução no consumo de energia pelo fato de corrigir o fator de potência dos motores. Além de apresentar uma série de vantagens, como: acionamento em rampa para ligar e desligar os motores evitando os picos de amperagem, minimiza a manutenção em mancais, eixos, rolamentos, etc, corrige o fator de potência aumentando a eficiência do motor, facilita a reversão do fluxo de ar pelos ventiladores, entre outras. Algumas desvantagens devem ser observadas; investimento inicial elevado, grandes reduções na rotação do motor afetam a refrigeração do mesmo, não sendo indicado funcionar o motor com menos que 30HZ segundo LOBOSCO & DIAS (1989).

#### **4.5.2 Modelo matemático para estimar o consumo de energia elétrica na secagem de madeira**

Os modelos estimadores do consumo de energia em função do tempo de secagem para o programa de 90°C, 4m/s constante e variável, apresentaram ambos coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) igual 0,99 e erro padrão da estimativa relativo ( $S_{yx}\%$ ) igual 0,33% e 2,09% respectivamente, indicando que os modelos são ótimos estimadores (Figura 50) (Anexo 38 e 39).

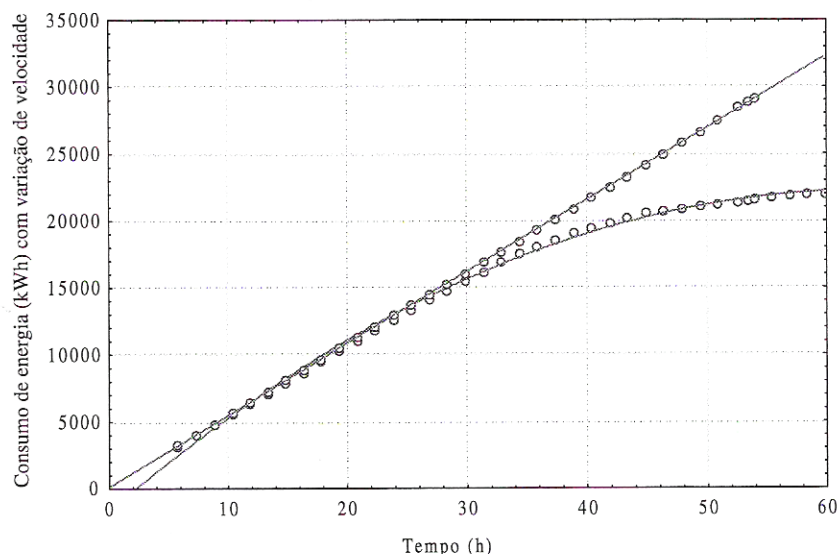
O modelo ajustado para estimar o consumo de energia com velocidade constante (WH) foi:

$$WH=137,9742+536,9391*t$$

O modelo ajustado para estimar o consumo de energia com velocidade variável (WHCV) foi:

$$WHCV=-1660,94+756,98*t-5,99*t^2$$

FIGURA 50. CURVAS DE REGRESSÃO REPRESENTANDO AS RELAÇÕES DO CONSUMO DE ENERGIA COM VELOCIDADE CONSTANTE E VARIÁVEL EM FUNÇÃO DO TEMPO (HORAS)



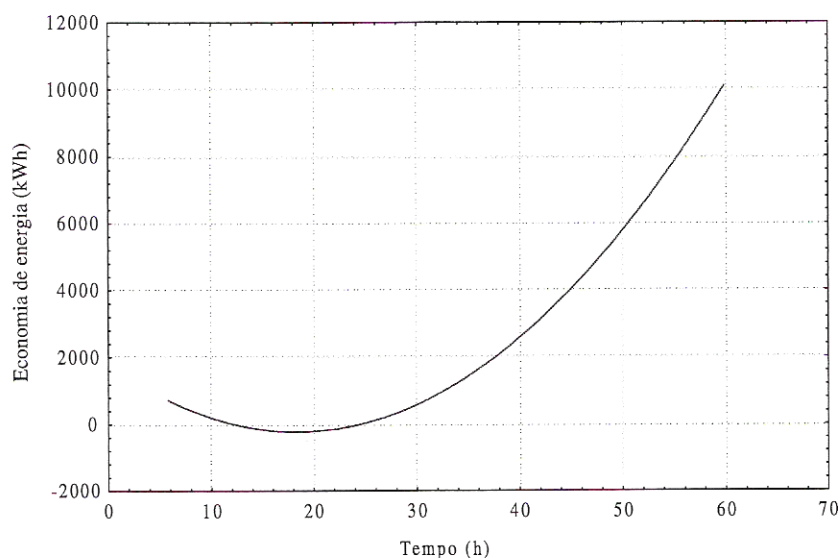
A equação que estima a economia de energia elétrica em função do tempo de secagem, resultado da diferença matemática entre os modelos citados acima, é apresentada na Figura 51. Pode-se observar que a curva apresenta um comportamento exponencial, indicando que os ganhos em economia de energia venham a ser mais que proporcionais aos acréscimos no tempo.

O modelo obtido e que estima a economia de energia elétrica foi:

$$EE=1798,91-220,04*T+5,9952*t^2$$

Ressalta-se que a precisão dos modelos obtidos é confiável dentro do range analisado e na condição de secagem aplicada.

FIGURA 51. CURVA DA DIFERENÇA MATEMÁTICA REPRESENTANDO A ECONOMIA DE ENERGIA (kWh) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM (h).



Comparando a curva acima com a que relaciona a energia elétrica consumida em função do fluxo de ar (Figura 8), pode-se observar uma mesma tendência, indicando que a economia de energia elétrica alcançada está relacionada inversamente com a vazão mínima de ar necessária durante o processo. Quanto maior for o tempo de secagem menor será a vazão de ar necessária e a potência utilizada pelo motor, resultando em uma maior economia de energia elétrica.

#### 4.6 ANÁLISE DO INVESTIMENTO ADICIONAL

Todos os programas analisados apresentaram *Pay-back* bastante próximos, em torno de 3 anos e 4 meses e em torno de 2 anos e 8 meses, quando se levou, ou não, em consideração a taxa de atratividade do mercado, valores estes que demonstram, portanto, a alta liquidez do investimento adicional proposto (Tabela 30).

TABELA 30. DIVERSOS MÉTODOS DE ANÁLISES DE VIABILIDADE ECONOMICA DO PROJETO

Programas	Economia (R\$/mês)	<i>Pay-back</i>	<i>Pay-back</i> <sub>(12%)</sub>	VLP <sub>(12%)</sub> (R\$)	TIR (%)
70-2	722,35	2 anos 8 meses	3 anos 4 meses	26.135,00	36,22%
70-4	733,82	2 anos 7 meses	3 anos 3 meses	26.911,00	36,86%
90-2	736,11	2 anos 8 meses	3 anos 4 meses	27.066,90	37,01%
90-4	731,53	2 anos 7 meses	3 anos 3 meses	26.755,93	36,75%

Onde:

70 2 = 70°C de temperatura, velocidade do ar 2m/s;

70 4 = 70°C de temperatura, velocidade do ar 2m/s;

90 2 = 90°C de temperatura, velocidade do ar 4m/s;

90 4 = 90°C de temperatura, velocidade do ar 4m/s.

Da mesma forma, todos os programas apresentaram Valor Líquido Presente (VLP<sub>12%</sub>) variando entre R\$26.135,00 (70-2) e R\$27.066,90 (90-2), valores estes que superam inclusive o valor do investimento adicional, comprovando novamente a viabilidade do projeto.

No que se refere a Taxa Interna de Retorno (TIR), os valores obtidos variaram em torno de 36,22% (70-2) e 37,01% (90-2), indicando que o investimento adicional com relação ao uso do inversor de frequência na secagem da madeira é altamente viável.



## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em função dos resultados e discussões apresentados conclui-se que:

a) Em relação ao sistema desenvolvido para avaliar a Câmara de secagem obteve-se:

- O sistema desenvolvido neste estudo avaliou eficientemente a câmara de secagem de madeira, visando o uso do inversor de frequência.

b) Com relação ao efeito na taxa de secagem obteve-se.

- O uso do inversor de frequência reduz a taxa de secagem, em média 12,26%.
- Com aumento de temperatura e da velocidade do ar o efeito de redução da taxa aumenta. A 90°C com 4m/s a redução observada foi de 13,33%.
- De qualquer forma a redução na taxa de secagem é pequena devido à necessidade de refinamento no controle do processo.
- O efeito sobre a taxa de secagem ocorre a partir da terceira faixa de teor de umidade (50 – 30%).

c) Relativo ao consumo de energia elétrica as seguintes conclusões são pertinentes:

- O uso do inversor de frequência reduz substancialmente o consumo de energia. Em média esta redução foi de 31,9%.
- A redução no consumo de energia não é afetada pela temperatura nem pela velocidade do ar.
- A redução do consumo de energia esta intimamente ligada a redução da velocidade do ar nas fases mais adiantadas da secagem ocorrendo abaixo da terceira faixa de teor de umidade (50 – 30%).

d) Relativo ao uso do inversor de frequência na qualidade da madeira:

- O efeito do uso do inversor de frequência na qualidade da madeira é pequeno. Em princípio alguns ganhos de qualidade foram obtidos,

incluindo.

- Menor escurecimento superficial
- Redução da intensidade da mancha marrom.
- Menor gradiente de umidade, e conseqüentemente menos tensões internas.

Estas observações são válidas para as duas temperaturas estudadas.

e) com relação ao modelo matemático desenvolvido para estimar a economia de energia elétrica.

- O modelo matemático desenvolvido para estimar a economia de energia poderá ser utilizado para avaliação em escala industrial. Os resultados obtidos no uso deste modelo no presente estudo indicam que o inversor de freqüência leva a uma substancial redução de custos.

f) Com relação a avaliação econômica do investimento adicional do inversor de freqüência na secagem da madeira.

- A avaliação econômica realizada indicou que o uso do inversor de freqüência em secagem de madeira serrada é atrativo. A taxa interna de retorno é de 36,5%, e o retorno será obtido em média a curto prazo (3 anos e 3 meses).
- A conclusão geral deste estudo é de que o atual estágio de conhecimento indica que o inversor de freqüência pode ser utilizado pela indústria.

Com base nos resultados, análises realizadas e as conclusões deste estudo, recomenda-se:

- Aprimorar o sistema utilizado neste estudo visando otimizar o controle, de forma a ter uma atuação contínua com base em informações precisas de umidade do material.
- Transferir os conhecimentos para o setor industrial para que a tecnologia aqui testada possa ser melhor aplicada.

- Expandir os estudos para avaliação do impacto do inversor de frequência em outras espécies, incluindo como prioridade o *Eucalyptus* e madeiras tropicais.
- Testar o uso do inversor de frequência nas fases de aquecimento e acondicionamento visando melhorar a conservação de energia elétrica durante o processo de secagem da madeira.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARANBRIGHT, D.G. **Developments in applied drying technology, 1971-1977.** Forest Products Journal 29(12):14-20, 1979.
- ARAYA R. A. & HENANDEZ L. K. **Secado a Alta Temperatura: Antecedentes Tecnicos sobre el comportamiento de la madera, diseño, Y ensayos experimentales.** Trabajo de titulacion presentado en conformidad a los requisitos para el titulo de ingeniero de ejecucion en maderas. Concepcion, 1993. 130p.
- BACHRICH, J.L. **Dry kiln handbook.** Vancouver: H.A.Simons, 1980. 371p.
- BAI, G.L. & GARRAHAN, P. **The temperature and moisture content in lumber during preheating and drying.** Wood Sci. Technology, New York, v. 18, n. 2, p. 121-135, 1984.
- BAILEY, I. W. Die Struktur der Tüpfelmembranen bei den tracheiden der koniferen., **Holz als Roch- und Werkstoff** Vol 15 (1957) p. 210/213.
- BAILEY, P.J. & PRESTON, R.D. **Some aspects of softwood permeability. Structural studies with Douglas fir sapwood and hartwood.** Holzforschung 23, p. 113-120, 1969
- BEN (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL) – **Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético da Secretaria de Energia – DNDE/SEM/MME.** Brasília, 2000. 154p.
- BALODIS, V. **Influence of grain angle on twist in seasoned boards.** Wood Science 5(1):44-50, 1972
- BELLMANN, H. **Über den Einflub der Tüpfelkapillaren und Micellarinterstizien auf die Mechanik von Imprägniervorgängen mit Lösungem.** Mitt. d. Bundesforschungsanstlt Reinbek. n. 37, 1955

- BOIS, J. P. & TSCHERNITZ, J. L. **The effect of air velocity on reaching cry kiln saturation temperatures for oak.** Forest Products Utilization, Technical report n. 11, 7p., 1981
- BRAMHALL, G. and WELLWOOD, R. W. **Kiln Drying of western Canadian lumber.** Western Forest Products Laboratory, Vancouver, British Columbia, 1976, 111p.
- BROWN, N. C. & BETHEL, J. S. **El secado de la madera.** In: \_\_\_\_\_. La industria maderera. México, Limusa, 1975. p.179-234.
- BROWN, H.P.; PANSHIN, A. J. & FORSAITH, C.C. **Wood in relation to moisture.** In: Textbook of wood technology. New York, McGraw Hill, 1952, v. 2, p. 61-98.
- BRUNNER R. & HILDBRAND, R. **Die Schitthoizarocknung. 5 Auflage,** Hannover, república Federal Alemana, 1987.
- CAMPBELL, W.B. **The cellulose-water relationship in papermaking.** Canadian Department of Interior Forest Service. Bulletin 84. p. 4, 114-128, 1933.
- CARTER, L. & SPRAGUE, M. **Improve lumber quality by analysing kiln environment.** Forestry Industries. T12-T15, 1989
- CECH, M. Y. & PFAFF, F. **Kiln operator's manual of Eastern Canada.** Ontario, Eastern Forest Products Laboratory, 1977. 189p.
- CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) – Disponível em <[WWW.cemig.com.br](http://WWW.cemig.com.br)> acesso 08 de dezembro de 2001.
- CHEN, Z.; WENGERT, E.M.; LAMB, F.M. **A technique to electrically measure the moisture content of wood above fiber saturation.** Forest products journal, v.44, n.9, p.57-62, 1994.
- CHOONG, E. **Moisture and the Wood of the Southern Pines.** Forest Service, USDA. Forest Products Journal. v. 19, n. 2, p. 30-36, 1969.
- COMOSTOCK, G.L. **Directional permeability of softwoods.** Wood and Fiber, 1 (4): 283-289, 1970.

- COMSTOCK, G.L. **Energy requirements for drying of wood products.** Madison, **Proceedings Wood Residue as na Energy Source.** Forest Products Research Society, 1975.
- CORDER, E. S. **Potential for energy recovery from lumber dry kilns.** Forestry Products Journal, vol. 30, n. 8, 1980.
- CULPEPPER, L. **HighTemperature Drying Enhancing Kiln Operations.** Miller Freem Publications, Inc. San francisco, Ca. USA, 1990.
- DEDRICK, D.S. **Some observations of the kinetics of lumber drying in conventional kilns.** Ms. presented to Annual Meeting of F.P.R.S. New York, N.Y. (unpublished), 1965
- DEDRICK, D.S. **Some observations of the kinetics of lumber drying in conventional kilns. Proceed.** 19 Annual Meeting, Western Dry Kiln Clubs. p. 5-11, 1968
- DEL MONTE, F.F. **Motores Assíncronos com Freqüência Variável.** Mundo Elétrico, 56p., 1980
- ECKELMAN, C. A. & BAKER, J. L. **Heat and hair requirements in the kiln drying of wood.** West Lafayette. Purdue University, Agric. Exp. Station Res. Bulletin, n.933, 1976. 19p.
- ELETOBRAS (Centrais Elétricas Brasileiras S/A Eletrobrás). **Energia e Desenvolvimento Sustentável.** Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético. Instituto de Economia – UFRJ, 160., 1998.
- ELETOBRAS (Centrais Elétricas Brasileiras S/A Eletrobrás). Disponível em [WWW.eletobras.gov.br](http://WWW.eletobras.gov.br) acesso 08 de dezembro de 2001.
- ERICKSON H.D. et all **The permeability of woods to liquids and factors affecting the rate of flow.** Min. Aggricultural Experimental Station. Technical Bulletin 122. pp. 42, 1937.
- FINIGHAN, R. **Can air-drying methods be improved?** Forest Prod. Newsletter, CSIRO, 261:1-2, 1960.

- FLEISCHER, H.O. **Drying rates of thin sections of wood at high temperatures.** Yale University. School of Forestry. Bulletin n. 59, 1953
- 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.
- FRICKE, K. W. **The relation of humidity and air circulation to the drying of timber.** Melbourne, CSIRO, Div. Of For. Prod. , 1968, 12p
- FULLER, J. **Conditioning stress development and factors that influence the prong test.** USDA, Forest Products Laboratory Research Paper FPL-RP-537, 6p., 1995.
- GABY, L.I. **Warping in southern pine studs.** SE-Southeastern Forest Experiment Station. Athens, GA., 1972
- GALVÃO, A . P.M. & JANKOWSKY, J.P. **Secagem racional da madeira.** São Paulo , NOBEL, 1985, 112p.
- GARRAHAN, P. **Taking the air of Kiln Drying costs.** Can. Wood Prod. , Montreal: p.24-25, 1993.
- GOGGANS, J.F. **Correlations and heritability of certain wood properties in loblolly pine.** TAPPI 47, pp. 318-322, 1964.
- GOMIDE, J.L. **Secagem de Madeira.** Viçosa-MG. Imprensa Universitária, 76p., 1969.
- GUERNSEY, F.W. **High temperature drying of British Columbia softwoods.** Forest Products Journal. 7(10): 368-371, 1957
- GUZENDA, R. & OLEK W. **Results os an analysis of energy consumption in kiln friers for sawn timber equipped with computer systems for steering.** In: Proc. 3<sup>rd</sup> IUFRO Conf. on Wood Drying, August, Vienna, Austria, IUFRO, Rome, Italy. p.260-268, 1992
- HANN, R.A. **Drying jellow – poplar at temperatures above 100°C.** Forestry Products Journal 14: 215-220, 1964.

- HARADA, H. **Further Observation on the Pit Structure of Woof.** J. Jap. Wood Res. Society. v.10, n. 6, p. 221-225, 1964
- HARRIS, J.M. **Heartwood Formation in *Pinus radiata* (D. Don.)** New Phytologist, v. 53, p. 517-524, 1954
- HART, C.A. **Principles moisture movement in wood.** For. Prod. Journal, 14 (5): 207-14, 1964.
- HART, C.A. **The Drying of Wood.** N.C. State Univ. Sch. For.Tech. Rep. ,27, 1965.
- HART, C.A. & THOMAS, R.J. **Mechanism of bordered pit aspiration as caused by capillarity.** Forestry Industries Journal, v. 17, n. 11, p. 61-68, 1967
- HART, C.A. **The drying of wood.** Raleigh, North Carolina Agric. Extension Service, 1966. 24p.
- HART, C.A. **The Drying of Wood.** The North Carolina Agricultural Extension Service. 1975. 36p. Revision.
- HART, C.A. **A user's manual for a family of simulations of moisture sorption in wood.** Dept. of Wood and Paper Science, North Carolina State University, Raleigh, 1983
- HART, C.A; DENIG, J. HANOVER, S. **Variables affecting drying rate and quality.** In: Proceedings, Drying softwood and hardwood lumber for quality and profit conference. Charlotte, N.C. Madison, WI: Forest Products Research Society, 1986.
- HILDEBRAND, R. **El secado de madera aserrada.** Madrid, Comercial Sagrera S.A., 1964. 159p.
- HILDEBRAND, R. **Kiln Drying os Sawn Timber.** Germany: R.H. Maaschinenbau Gmbh, 1970. 204p.
- HIRSCHFELD H. **Engenharia Economica e Análise de Custo; Aplicações Práticas para Economistas, Engenheiros, Analistas de Investimentos e Administradores.** 6<sup>a</sup> E. Editora Atlas SP, 407p., 1998.



- HOLMES S. **A shopper's guide to electronic kiln controls.** For. Ind., San Francisco, v. 115, n. 7. p. T10-T114, July 1988.
- HOLMES, S. **Optimizing grade recovery in lumber drying operations.** Forest Industries 116(7):T5-T10, 1989.
- 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.
- HUNTER, A. J. **Wood drying and Fick's second law.** Wood Science and Technology 30, 355-359, Springer-Verlag, 1996.
- IUDÍCIBUS, S.: **Contabilidade gerencial.** Atlas, 4ª Edição. São Paulo, 1986.
- JAMES, W.L. **Electric moisture meters for wood.** USDA For. Service. Res. Pap. FPL 6 For. Prod. Lab., Madison, Wis., 1975.
- JANKOWSKY, I.P. **Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira.** Piracicaba, ESALQ/USP Tese Mestrado. p. 94, 1979.
- JANKOWSKY, I.P. **Melhorando a eficiência dos secadores para madeira serrada.** ISSN 0100-3453. Circular Técnica IPEF, n. 191, 2000.
- JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA/JUNAC. 1989. **Manual del Grupo Andino para el secado de maderas.** 1ª Ed. Lima.
- KATS A.R. & MILLER, D.G. **Effect of water storage on electrical resistance of wood.** Forest Products Research Branch. Contribution n. P-17. Department of Forestry, Canada, 1963.
- KINNINMONTH, J.A. MILLER & RILEY, S. **Energy consumption in wood drying.** Wood drying papers present at the IUFRO DIVISION V conference – Oxford – England. Forest Research Institute. New Zeland Forest Service, 1980.
- KISHIMA, T. & HAYASHI, S. **On the Vlosure of Bordered Pit-Pairs in Coniferous Tacheids.** Wood Research, n. 27, p. 22-39, 1962

- KNOEDT, C. **Cenário: uma visão otimista sobre os investimentos no setor energético brasileiro.** Brasil Energia, n. 208, Rio de Janeiro, Março, 1998. p. 8-10.
- KOCH, P. **Process for straightening and drying southern pine 2 by 4's in 24 hour.** For. Prod. J. 21 (5): 17-24, 1971.
- KOCH, P. **Utilization of southern pines.** Washington, USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1972. 2 v. ( Agriculture Handbook, n. 420).
- KOEHLER, A. **Rapid growth hazards usefulness of southern pine.** J. Forestry. 36(2):153-159, 1938
- KOLLMANN, F. F. P. & CÔTÉ, W. A. **Principles of Wood Science and Technology.** Berlin, Springer - Verlag, 1968 V. I. 592p.
- KOLLMANN, F.F.P & SHENEIDER, A. **Der einfluss der Stromungsgeschwindigkeit auf die Heißdampftrocknung von Schnittholz.** Holz als Roh-und Werkstoff, 19: 461-478. 1961.
- KOLLMANN, F.F.P. & HOCKELE G. **A critical comparison of several methods to determine the wood moisture content.** Holz als Roh-und Werkstoff. 20(12), 1962.
- KOLLMANN, F.F.P. **Tecnologia de la Madera e sus Aplicaciones.** 2 ed. Madrid: Ministério da Agric. , Instituto Florestal de Investigaciones, Experiências, 1959. v1 675p.
- LEONE, G.S.G.: **Custos: planejamento, implantação e controle.** Atlas, 2ª Edição. São Paulo, 1989.
- LIESE, W. **The fine structure of bordered pits in softwoods.** In: CÔTÉ, W.A. JR. (Ed. Cellular Ultrastructure of Wood Plants. Syracuse Univ. Press. p. 271-290, 1965
- LITTLE, R.L. & TOENNISSON, R.L. **Drying hardwood lumber using computer controlled mini-step schedules.** In: Upgrading Wood Quality Through Drying Technology. IUFRO. Weyerhaeuser Co., Tacoma, Wash. p. 203-212, 1989
- LOBOSCO O. S. & DIAS. J.L. da C. **Seleção e aplicação de motores elétricos.** Série Brasileira de Tecnologia, v. 2, 512p., 1988

- LOPES F. S. & WIPIESKI C. **Termelétricas: uma nova oportunidade de negócios na indústria madeireira.** Informativo STCP, n.5, p. 16-18, 2001
- LYMAN, L. C. **Effect of air flow on heat transfer and water evaporation in jet-drying systems.** Forest Products Journal, 15(10):453-558, 1965.
- MACKINEY, A.L. & CHAIKEN, L.E. **Heartwood in secondgrowth loblolly pine.** USDA Forest Service. Appalachian Forest Experimental Station Technical Note 18, p. 3, 1935.
- MAKAY, J.F.G. **Effect of high temperature kiln drying on lumber.** In: Res. Conf. on High-Temperature Drying. effects on Mechanical Properties of Softwood Lumber. USDA, F.P.L. Madison, Wisc. Proceeding, 1976.
- McMILLEN, J. M. & WENGERT, E.M. **Drying eastern hardwood lumber.** Madison, USDA For. Prod. Lab. 1978. 140p (Agriculture handbook, 528)
- MCMILLEN, J. M. **Stresses in wood during drying.** Madison, Forest Products Laboratory, p. 52, 1963 .
- MCMILLIN, C.W. **Fibril angle of loblolly pine wood related to specific gravity, growth rate, and distance from pith.** USDA Forest Service, Southern Forest Experimental Station, Alexandria – La. Final Report FS-SO-321.1-23, 1969.
- MILLER W. & RILEY, S. **Computer control of softwood drying,** Forestry Research Institute, Private Bag, Rotorua New Zealand, p. 169-179, 1989
- MILLETT, M.A. **Chemical brown stain in sugar pine.** Journal of Products Research Society, p. 232-236, 1952.
- MILLS, R. (ed.) **Australian Timber Seasoning Manual,** Australian Furniture Research and Development Institute Ltd., Launceston, Tasmania, Australia, 1991
- MILOTA, M.R. & TSCHERNITZ, J.L. **Correlation of loblolly pine drying rates at high temperature.** Wood and Fiber Science. 22(3):298-313, 1990.
- MISSENARD, A. **Curso superior de calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire.** Editorial Paraninfo. Madrid, España, 1963

- MORESCHI, J.C. **Realção água madeira e sua secagem.** Curso de Pós-Graduação em engenharia florestal setor de ciência agrárias da UFPR. 1975, 91 pg.
- MUÑIZ G.I.B. **Anatomia da madeira de espécies arbóreas da floresta estacional semidecidual de Misiones, Argentina** - Curso de Pos-graduação - UFPR, 1993
- MUNSELL **Color charts for plant tissues.** Unsell Color Company Inc. Baltimore, Maryland, USA. 1968.
- PAGE, R. **High temperature versus conventional methods of drying southern pine lumber.** res. Pap. 73. Macon, GA: Georgia Forest Productas Laboratory, 274p., 1973
- PEREIRA, C.D.J. **Formação e controle da mancha marrom em madeira serrada de *Pinus elliotti* ENGEM VAR. *elliottii*.** Tese de doutorado, UFPR, 1992
- PEREZ JÚNIOR, J.H.; PESTANA, A.O.; FRANCO, S.P.C.: **Controladoria de gestão: teoria e prática.** Atlas, 2ª Edição. São Paulo, 1997.
- PERRY, J.H. **Chemical Engineers Handbook.** New York, mcGraw-Hill Book Company, 1950, 3. ed.
- PHILLIPS, E.W.J. **Movement of the Pit Membrane in Coniferous Woods, with Special Reference to Preservative Treatment.** Forestry vol. 7, p.109-120, 1933
- PONCE, R. H. & WATAI, L.T. **Manual de Secagem da Madeira.** São Paulo, IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Ministério da Indústria e do Comércio, Secretaria de Tecnologia Industrial, 1985. 70p.
- 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
- PRICE, E.W & KOCH, P. **Kiln time and temperature affect shrinkage, warp, and mechanical properties of southern pine lumber.** Forest Products Journal, vol. 30 n. 8, p. 41-48, 1980.

- SALAMON, M. **Comparison of kiln schedules for drying spruce.** Forest Products Journal, v. 23, n. 3, 1973
- SANTINI E. J. **Alternativas para Monitoramento e Controle do Processo de Secagem de Madeira Serrada em Estufa.** Curitiba, 1996. 203 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná.
- SANTINI, E.J. & TOMASELLI, I. **Uso da Queda da temperatura na passagem pela pilha como instrumento de controle do processo de secagem de madeiras.** Revista *Árvore*. Viçosa-MG, v.21, n. 2, p.269-277, 1997.
- SANTINI, E.J. **Influência da temperatura na taxa de secagem e contração da madeira de *Pinus elliottii* proveniente de plantios de rápido crescimento.** Curitiba, FUPEF, 1980. 15p. ( Série Técnica n. 5).
- SCHMIDT, S. **Economic Evaluation of Control System for Kiln Drying Equipment for Sawn Lumber. Seminar od Wood Processing Industries.** ONUDI-UM. Colonia y Hannover. república Federal Alemana, 1984.
- SCHMITZ Revista Controle & Instrumentação Edição nº56, março 2001 Disponível em <[WWW.controleinstrumentação.com.br](http://WWW.controleinstrumentação.com.br) > acesso 10 de dezembro de 2001.
- SCHNEIDER, A. **Investigations on the convection drying of lumber at extremely high temperatures.** Part I: course of drying and board temperature at drying temperature from 110°C to 190°C. Holz als Roh-und Werkstoff 30: 382-394.
- SEVERO, E. T. D. **Efeito da Temperatura e da Velocidade do Ar na Secagem de Madeira Serrada de *Pinus elliottii*.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 1986. 109p.
- SHELLY, J.R.D.G.A. & BIRNBACH M. **Severe warp development in young-growth ponderosa pine studs.** Wood Fiber Sci. 11(1): 50-56, 1979
- SIAU, J. F. **Flow in Wood.** Syracuse University Press, New York, EUA. 1971, 131p.

- SIAU, J.F. **Transport process in wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245p. (Springer Series in Wood Science).
- SIEMENS MICROMASTER VECTOR / MIDIMASTER VECTOR. **Instruções de Operações**, 69p. 1998.
- SIEMENS Simovert Masterdrivers – **Engineering Manual for Drive Converters**, 1999.
- SILVA, D.A. **Avaliação da eficiência energética de uma indústria de painéis compensados** – Tese de Doutorado em Ciências Florestais, apresentada para a UFPR, 204p., 2001.
- SIMPSON W. T. & TSCHERNITZ J. L. **Time, Costs, and Energy Consumption for Dryind Red Oak Lumber as Affected by Thickness and Thickness Variation**. Forest Product Journal, vol. 30, n. 1, p. 23-28, 1980.
- SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Agric. Handb. 1888. Washington, DC: US. Department of Agriculture, 274p., 1991.
- SIMPSON W. T. **Effect of air velocity on the drying rate of single eastern white pine boards**. USDA Forest Service, Research Note FPL-RN-266, 5p., sep. 1997.
- SIMPSON W. T. & TSCHIENITZ J. L. **Effect of thickness variation on warp in high-temperature drying plantation-grown loblolly pine 2 by 4's**. Wood and Fiber Science, 30(2), p. 165-174, 1998.
- SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse. Syracuse University Press, 1972. 218p. (Syracuse Wood Science Series, 4).
- SKAAR, C Some factors involved in the electrical determination of moisture gradients in wood. **For. Prod. J.**, Madison, c 14, n 6, p. 239-2443, june 1964.
- SKAAR, C. **Effect of high temperature on the rate of degradation and reduction of hygroscopicity of wood**. In: Proceedings of Res. conf. on high temperature drying effects on mechanical properties of softwood lumber. USDA. F.P.L. Madison, Wisc. 1976.

- STAMM, A. J. **Wood cellulose liquid relationship**. North Caroline Experimentation Station Technology. Bulletin n. 50, 1962.
- STAMM, A. J. **Movements of fluids in wood – part 2: Diffusion**. Wood Science and Technology. 1:205-30, 1967
- STAMM, A.J. **Wood and Cellulose Science**. New York: Ronald Press, 1964. 549p.
- STEEL, R.G.D. & TORRIE, J.H. **Principles and procedures of statistics**. New York. McGrae-Hill, 1960. 481p.
- 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.
- TAUTZ, C. **Eletricidade: reforço na transmissão tem programa de R\$28 bilhões**. Brasil Energia, Rio de Janeiro, n. 208, março 1998, p. 37-40.
- TAYLOR, F.W & LANDOCH, D. **TDAL profiles os southern pine lumber during drying**. For. Prod. J., Madison, v. 40, n. 10, 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, 1989.
- TOMASELLI, I. **The influence of high-temperature drying on some physical and mechanical properties of Pinus radiata** D. Don. Melboune, University of Melbourne, Faculty of Agriculture and Forestry, 1977.264p.( Tese de Doutorado).
- TOMASELLI I. & GROSSMAN, P.U.A. **High Tempearture Drying of Pinus radiata wood**. Part I – Physical Aspects: drying rates and internal temperature of wood, 1980.
- TOMASELLI, I. **Aspectos físicos da secagem da madeira de Pinus elliottii Engelm. acima de 100° C**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 128p. 1981. (Tese para Professor Titular).

- TOMASELLI, I. **Brown stain in *Pinus elliottii* sawn wood.** In: IUFRO DIVISION 5 MEETING, 1988, São paulo. Proceedings of wood drying working party sessions. p. 94-100.
- TORGESON, O . W. **Lumber drying time – effect of air velocity.** Lumberman, 42(12):42-4, 1941.
- TORGESON, O . W. Circulation of ar in a lumber dry kiln. **For. Prod. Laboratory.** U.S. Departament of Agrixulture Forest Service. Madison 5 Wisconsin, Report No. 1678. 1959. 6p.
- VILLIERE, A . **Séchage des bois.** Paris, Dunod, 6<sup>a</sup> ed., 1966. 410p.
- VOORHIES G. & BLAKE B.R. **Properties affecting drying characteristics of young-growth ponderosa pine.** Arizona Forestry Note 14. Flagstaff, A.Z., 1981
- VRANIZAN, J. & SHINN, J. Just Enough Air Efficient Pneumatic Conveying Disponível em < [http:// WWW justenoughair.com](http://WWW.justenoughair.com)> Acesso dia 15 dezembro de 2001.
- VRANIZAN, J.M. & WOHLGEMUTH, C.W. **Conserving electricity in lumber dry kilns.** For. Ind., San Francisco, v. 115, n. 7, p. T28-T30, July1988.
- 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 transmissicity of southern pine wood, plywood, fiberboard and particleboard.** Wood Si. 2, p. 54-60, 1969.
- WENGERT, E.M. & LAMB F. M. **Matching a drying system to a mill's requirements.** Forest Ind. 115(7):T1-T5, 1988.
- WENGERT, E.M. **The cost of drying softwood dimension.** In : Dring Madison, Wis. (1989),
- WENGERT, E.M. **Drying oak lumber.** Madison, WI: Department of Forestry, University of Wisconsin-Madison. 167p., 1990.



- WENGERT, E.M. & MEYER D. **Energy at the sawmill: conservation and cost reduction.** Forestry Facts n. 61. Univ. of Wisconsin-Madison, Madison, Wis. 8p., 1992
- WEGERT, 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.
- WERKSTOFFE & SHNEIDER A. **The influence of the air velocity on the kiln drying of timber in mixtures of hot air and ateam.** (in German: English summary), Holz als Roh-und Wekstoff 18(3):81-84, 1960
- WRIGHT, G.W. **Brief notes on moisture gradient, drying stresses and movement on re-cutting.** CSIRO. Forestry Products Lab. (relatório não publicado). 1961.
- YAKSIC Revista Controle & Instrumentação Edição nº56, março 2001 Disponível em [WWW.controleinstrumentação.com.br](http://WWW.controleinstrumentação.com.br) > acesso 10 de dezembro de 2001.
- YONGS, R.L. **Mechanical properties of red oak related to drying.** Forest Products Journal. 7(10):315-24, 1957
- ZADERENKO C. **Determinación de tiempos de secado por difusión em câmaras convencionales para *Pinus taeda* implantado de Misiones – Tesis de Maestria em tecnología de la madera celulosa y papel – Universidad Nacional de Misiones, 166 p., 2000.**
- ZIEGLER, G. A. **Addressing the basics of successful lumber drying.** For. Ind., San Francisco, v. 115, n. 7, p. T6-T8, July 1988.
- ZOBEL, **Juvenility in wood production, in recent advances in botany.** Univ. of Toronto Press. pp. 1663-1665. 1961.



ANEXO 1. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO (ANOVA) PARA MASSA ESPECÍFICA APARENTE VERDE (MEAPV)

TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS

Variável	Bartlett	Gl	p-valor
MEAPV	12,08212	7	0,097933

ANÁLISE DE VARIÂNCIA – INTEIRAMENTE CASUALIZADO

Fonte de Variação	G.L.	SQ do Efeito	Gl do erro	SQ do erro	F	p-valor
1	7	0,000730	344	0,002935	248851	0,9723

ANEXO 2. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO (ANOVA) PARA O TEOR DE UMIDADE INICIAL (TUI)

TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS

Variável	Bartlett	Gl	p-valor
MEAPV	3,943091	7	0,786301

ANÁLISE DE VARIÂNCIA – INTEIRAMENTE CASUALIZADO

Fonte de Variação	G.L.	SQ do Efeito	Gl do erro	SQ do erro	F	p-valor
1	7	1002,066	326	501,6216	10,88374	0,04924

ANEXO 3. TESTE DE COMPARAÇÃO MÉDIAS (TUKEY)

	90SV4	90CV4	70SV4	70CV4	90SV2	90CV2	70SV2	70CV2
	123,3737	118,331	121,169	115,911	130,167	119,043	126,976	118,595
90SV4								
90CV4	0,97274							
70SV4	0,99986	0,9992						
70CV4	0,82288	0,9997	0,96889					
90SV2	0,8672	0,2177	0,6020	0,0438				
90CV2	0,98759	1,0000	0,9998	0,9983	0,2708			
70SV2	0,99596	0,6212	0,9366	0,31740	0,9976	0,7010		
70CV2	0,98062	1,0000	0,9996	0,9994	0,2514	1,0000	0,6661	

ANEXO 4. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA (MEAPS)

TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS

Variável	Bartlett	Gl	p-valor
MEAPV	12,08212	7	0,097933

ANÁLISE DE VARIÂNCIA – INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado Médio	F	p-valor
1	1	0,001858	0,6329	0,4268
2	1	0,002246	0,7651	0,3823
3	1	0,000005	0,0016	0,9680
1 X 2	1	0,000045	0,0154	0,9010
1 X 3	1	0,000007	0,0022	0,9618
2 X 3	1	0,000911	0,3102	0,5778
1 X 2 X 3	1	0,000042	0,0141	0,9053
ERRO	344	0,002935		

1-VELOCIDADE DO AR

2-TEMPERATURA

3-INVERSOR DE FREQUÊNCIA

ANEXO 6. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA O FATORES – VELOCIDADE, TEMPERATURA, INVERSOR E VELOCIDADE DO AR / INVERSOR DE FREQUÊNCIA (TUFP)

FATOR – VELOCIDADE DO AR

Variável	4m/s	2m/s
	8,864000	8,166095
4m/s		0,000009
2m/s	0,000009	

FATOR – TEMPERATURA

Variável	90°C	70°C
	8,023103	9,006992
90°C		0,000009
70°C	0,000009	

FATOR – INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Variável	SEM	COM
	8,296297	8,733798
SEM		0,000012
COM	0,000012	

FATORES – VELOCIDADE DO AR / INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Variável	4m/s - SEM	4m/s - COM	2m/s - SEM	2m/s - COM
	8,306825	9,421176	8,285769	8,046420
4m/s – SEM				
4m/s – COM	0,000008			
2m/s – SEM	0,998580	0,000008		
2m/s – COM	0,202394	0,000008	0,271527	

ANEXO 7. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA O TEOR DE UMIDADE FINAL ELÉTRICO (TUFE)

TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS

Variável	Bartlett	Gl	p
TUFE	29,26607	7	0,086130

ANÁLISE DE VARIÂNCIA – INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL

Variável	G.L.	Quadrado Médio	F	p-valor
1	1	28,92276	21,2146	0,0000
2	1	46,90980	34,4080	0,0000
3	1	11,60003	8,5085	0,0037
1 X 2	1	3,95253	2,8991	0,0895
1 X 3	1	33,07503	24,2603	0,0000
2 X 3	1	1,73321	1,2713	0,2603
1 X 2 X 3	1	7,07389	5,1886	0,0233
ERRO	344	1,363340		

1-VELOCIDADE DO AR

2-TEMPERATURA

3-INVERSOR DE FREQUÊNCIA

ANEXO 8. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA O FATORES – VELOCIDADE, TEMPERATURA, INVERSOR E VELOCIDADE DO AR / INVERSOR DE FREQUÊNCIA E VELOCIDADE DO AR / TEMPERATURA / INVERSOR DE FREQUÊNCIA (TUFE)

FATOR – VELOCIDADE DO AR

Variável	4m/s	2m/s
	8,772159	8,198864
4m/s		0,000013
2m/s	0,000013	

FATOR – TEMPERATURA

Variável	90°C	70°C
	8,120455	8,850568
90°C		0,000009
70°C	0,000009	

FATOR – INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Variável	SEM	COM
	8,303977	8,667046
SEM		0,003538
COM	0,003538	

FATORES – VELOCIDADE DO AR / INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Variável	4m/s - SEM	4m/s - COM	2m/s - SEM	2m/s - COM
	8,284091	9,260227	8,323864	8,073864
4m/s - SEM				
4m/s - COM	0,000008			
2m/s - SEM	0,995937	0,000008		
2m/s - COM	0,630454	0,000008	0,486592	





**ANEXO 9. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA A MEDIÇÃO DA CONTRAÇÃO EM LARGURA (MCL)**

**TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS**

Variável	Bartlett	Gl	p
MCL	5,382868	7	0,613351

**ANÁLISE DE VARIÂNCIA – INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL**

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado Médio	F	p-valor
1	1	22,56612	20,5969	0,0000
2	1	1,32259	1,2071	0,2726
3	1	2,45366	2,2395	0,1354
1 X 2	1	0,64689	0,5904	0,4427
1 X 3	1	0,43382	0,3959	0,5296
2 X 3	1	0,01406	0,0128	0,9098
1 X 2 X 3	1	0,21559	0,1967	0,6576
ERRO	344	1,095608		

1-VELOCIDADE DO AR

2-TEMPERATURA

3-INVERSOR DE FREQUÊNCIA

ANEXO 10. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA O FATORES – VELOCIDADE, TEMPERATURA, INVERSOR E VELOCIDADE DO AR / INVERSOR DE FREQUÊNCIA E VELOCIDADE DO AR / TEMPERATURA / INVERSOR DE FREQUÊNCIA (MCL)

FATOR – VELOCIDADE DO AR

Variável	4m/s	2m/s
	3,492102	3,998495
4m/s		0,000014
2m/s	0,000014	

**ANEXO 11. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA A MEDIÇÃO DA ESPESSURA (ME)**

TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS

Variável	Bartlett	Gl	p-valor
ME	108,5935	7	0,102363

ANÁLISE DE VARIÂNCIA – INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado Médio	F	p-valor
1	1	2,931488	2,3403	0,1269
2	1	7,043970	5,6235	0,0182
3	1	1,750634	1,3976	0,2379
1 X 2	1	0,290743	0,2321	0,6302
1 X 3	1	0,269802	0,2153	0,6428
2 X 3	1	0,051676	0,0412	0,8391
1 X 2 X 3	1	0,180079	0,1437	0,7047
ERRO	344	1,252575		

1-VELOCIDADE DO AR

2-TEMPERATURA

3-INVERSOR DE FREQUÊNCIA

## ANEXO 12. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA O FATOR TEMPERATURA (ME)

## FATOR – TEMPERATURA

Variável	90°C	70°C
	4,179647	3,896724
90°C		0,017729
70°C	0,017729	

ANEXO 13. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA A MEDIÇÃO DA CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA (MCV)

TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS

Variável	Bartlett	Gl	p
MCV	56,46290	7	0,086302

ANÁLISE DE VARIÂNCIA – INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado Médio	F	p-valor
1	1	8,79112	4,7484	0,0300
2	1	12,82703	6,9284	0,0088
3	1	0,08326	0,0449	0,8321
1 X 2	1	1,92805	1,0414	0,3082
1 X 3	1	1,43870	0,7771	0,3786
2 X 3	1	0,05875	0,0317	0,8587
1 X 2 X 3	1	0,91131	0,4922	0,4834
ERRO	344	1,851365		

1-VELOCIDADE DO AR

2-TEMPERATURA

3-INVERSOR DE FREQUÊNCIA

ANEXO 14. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA O FATOR VELOCIDADE DO AR E TEMPERATURA (MCV)

FATOR – VELOCIDADE DO AR

Variável	4m/s	2m/s
	7,479723	7,795792
4m/s		0,029331
2m/s	0,029331	

FATOR – TEMPERATURA

Variável	90°C	70°C
	7,828651	7,446864
90°C		0,008497
70°C	0,008497	

**ANEXO 15. TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS E ANÁLISE DE VARIÂNCIA INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL (ANOVA) PARA A DETERMINAÇÃO DO GRADIENTE DE UMIDADE (GU)**

**TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIAS**

Variável	Bartlett	Gl	p
GU	6,640943	7	0,467215

**ANÁLISE DE VARIÂNCIA – INTEIRAMENTE CASUALIZADO EM FATORIAL**

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado Médio	F	p-valor
1	1	0,564568	1,7395	0,1891
2	1	0,380831	1,1734	0,2804
3	1	0,010977	0,0338	0,8543
1 X 2	1	4,014226	12,3684	0,0005
1 X 3	1	0,487996	1,5035	0,2220
2 X 3	1	9,922647	30,5731	0,0000
1 X 2 X 3	1	0,103130	0,3177	0,5737
ERRO	152	0,324554		

1-VELOCIDADE DO AR

2-TEMPERATURA

3-INVERSOR DE FREQUÊNCIA



ANEXO 16. TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS (TUKEY) PARA OS FATORES VELOCIDADE DO AR / TEMPERATURA E DA TEMPERATURA / INVERSOR DE FREQUÊNCIA (GU)

FATOR – VELOCIDADE DO AR / TEMPERATURA

Variável	4m/s – 90°C	4m/s – 70°C	2m/s – 90°C	2m/s – 70°C
	0,3803214	0,7946854	0,5783077	0,3590925
4m/s – 90°C				
4m/s – 70°C	0,006290			
2m/s – 90°C	0,405106	0,324373		
2m/s – 70°C	0,998356	0,003520	0,312727	

FATOR – TEMPERATURA / INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Variável	90°C - SEM	90°C - COM	70°C - SEM	70°C - COM
	0,7366285	0,2220006	0,3361405	0,8176374
90°C - SEM				
90°C - COM	0,000316			
70°C - SEM	0,009052	0,806932		
70°C - COM	0,920442	0,000024	0,000921	

ANEXO 17. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 70°C COM 2 M/S E SEM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Variável	T	TUE	DT	TUP	TXS	WHsv	WHcv
T	1,00						
TUE	-0,96	1,00					
DT	-0,95	0,92	1,00				
TUP	-0,98	0,94	0,92	1,00			
TXS	-0,86	0,88	0,77	0,92	1,00		
WHsv	1,00	-0,96	-0,95	-0,97	-0,86	1,00	
WHcv	0,98	-0,93	-0,92	-1,00	-0,91	0,98	1,00

Legenda:

T = Tempo (h)

TUE = Teor de umidade resistivo (%)

DT = Delta T

TUP = Teor de umidade gravimétrico (%)

TXS = Taxa de secagem (%U/h)

WHsv = Consumo de energia (Wh) sem variar velocidade

WHcv = Consumo de energia (Wh) com variação de velocidade

ANEXO 18. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO

$$TUP=248,5753-51,4597*Ln(t)$$

$R^2=0,97$        $R^2$  ajustado=0,97       $F(1,45)=1662,20$        $p<0,00000$   
 $Syx=6,21$        $Syx\%=12,35\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(45)	probabilidade
$b_0$	248,5753	4,947195	50,2457	0,000000
$b_1$	-51,4597	1,262191	-40,7701	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

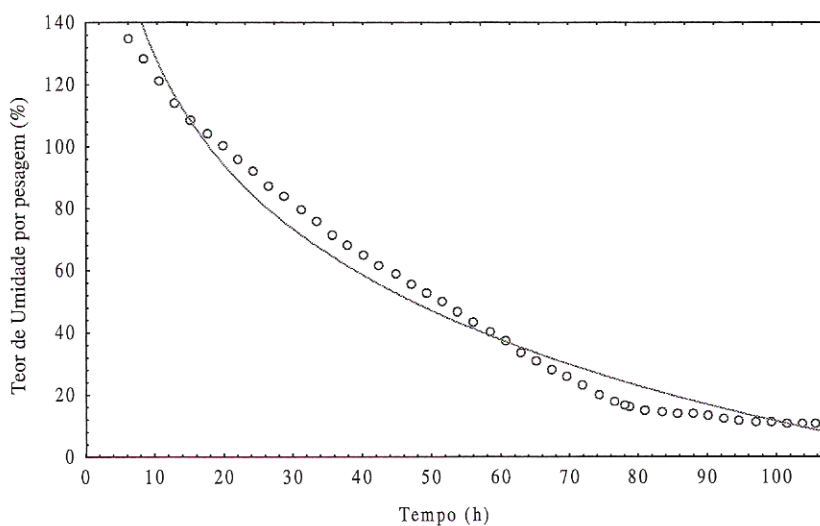
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$  e  $b_1$  = Coeficientes da equação

*Curva da regressão representando a relação entre o Teor de Umidade por pesagem (%) e o Tempo (h)*



## ANEXO 19. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO

$$TXS=5,692336-0,942070*LN(t)$$

$R^2=0,93$        $R^2$  ajustado=0,93       $F(1,44)=602,05$   $P<0,00000$

$Syx=0,19$        $Syx\%=8,95\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(45)	probabilidade
$b_0$	5,692336	0,149789	38,0024	0,000000
$b_1$	-0,942070	0,038394	-24,5367	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

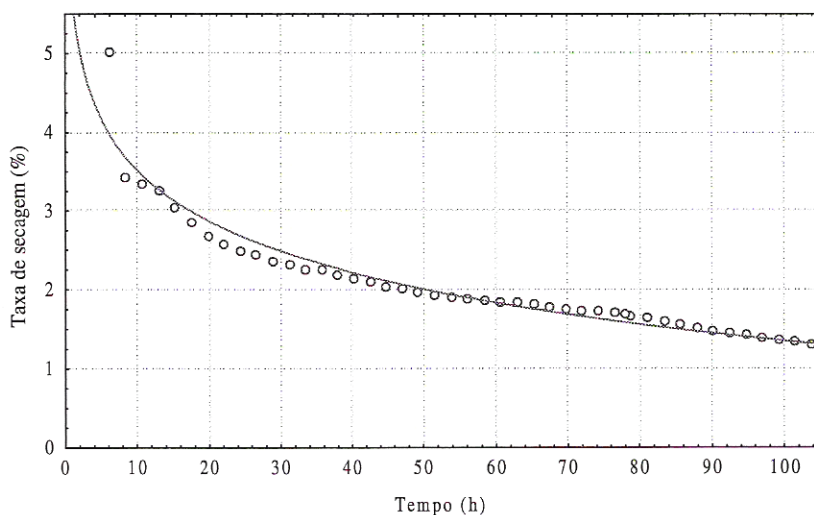
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$  e  $b_1$  = Coeficientes da equação

*Curva de regressão representando a relação Taxa de secagem (%) e o Tempo (h)*



ANEXO 20. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO TEMPO

$$WH=5,692336-0,942070*(t)$$

$R^2=0,99$        $R^2$  ajustado=0,99       $F(1,42)=7048E2$        $p<0,00000$   
 $Syx=119,63$        $Syx\%=0,12\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(45)	probabilidade
$b_0$	16,7555	39,28559	0,4265	0,671917
$b_1$	539,5059	0,64262	839,5415	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$  e  $b_1$  = Coeficientes da equação

ANEXO 21. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO CONSUMO DE ENERGIA COM USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM FUNÇÃO DO TEMPO

$$WHCV = -778,920 + 661,530 * (t) + -2,681 * (t^2)$$

$R^2 = 0,99$

$R^2$  ajustado = 0,99

$F(2,44) = 17324$   $P < 0,00000$

$S_{yx} = 400,15$

$S_{yx}\% = 1,54\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(45)	probabilidade
$b_0$	-778,920	212,8987	-3,6586	0,000675
$b_1$	661,530	8,5148	77,6917	0,000000
$b_2$	-2,681	0,0727	-36,8859	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

P = Probabilidade

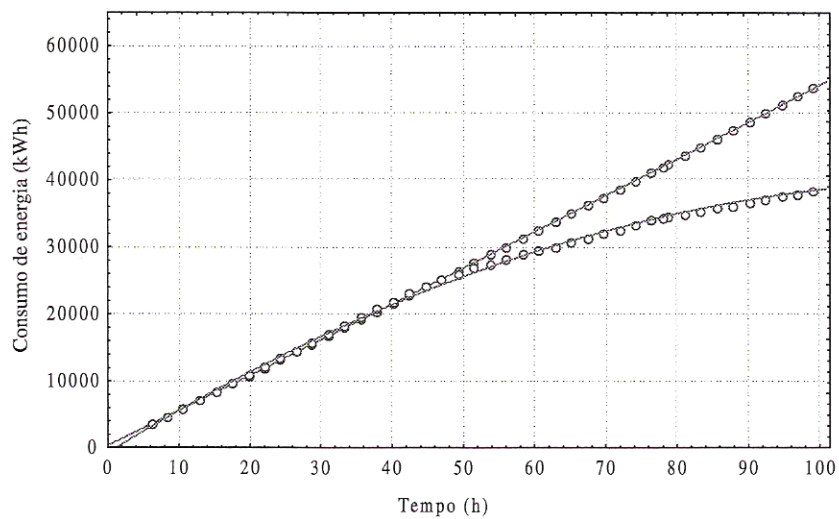
$S_{yx}$  = Erro Padrão da Estimativa

$S_{yx}\%$  = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  = Coeficientes da equação

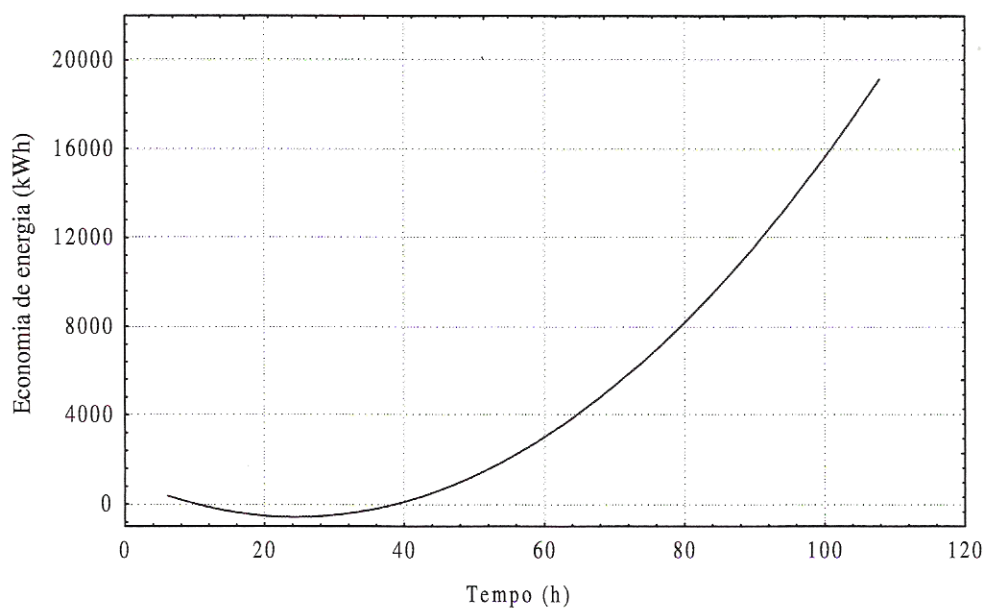
Curva de regressão representando a relação Consumo de energia (kWh) em função do Tempo (horas)

$$WH=5,692336-0,942070*(t) \text{ E } WHCV=-778,920+661,530*(t)+-2,681*(t^2)$$



Curva da equação diferencial representando a economia de energia (kWh) em função do Tempo (horas)

$$EE=795,6754-122,0236*t+2,8393367*t^2$$



ANEXO 22. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM

$$TXS=1,191036+0,027072*TUP-0,000318*TUP^2+0,000002*TUP^3$$

$R^2=0,99$

$R^2$  ajustado=0,98

$F(3,41)=643,77 P<0,00000$

$Syx=0,08255$

$Syx\%=4,10\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(45)	probabilidade
$b_0$	1,191036	0,056601	21,04264	0,000000
$b_1$	0,027072	0,004158	6,51159	0,000000
$b_2$	-0,000318	0,000075	-4,23218	0,000127
$b_3$	0,000002	0,000000	5,19505	0,000006

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

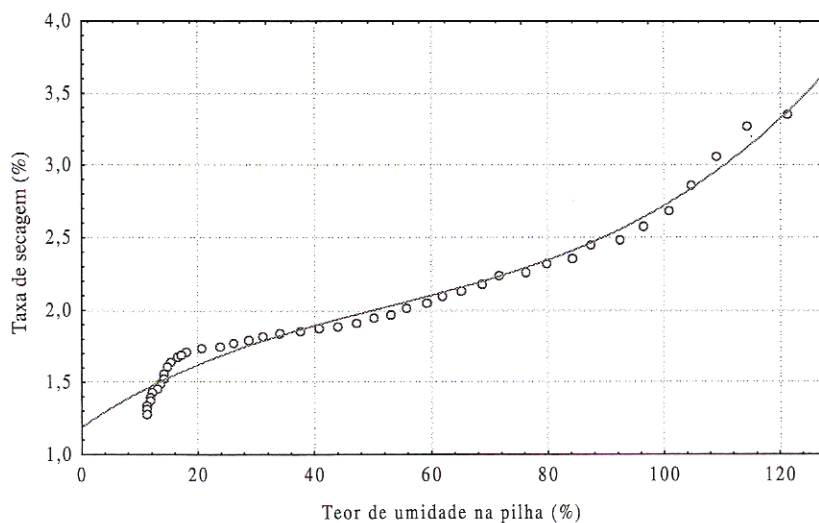
P = Probabilidade

$Syx$  = Erro Padrão da Estimativa

$Syx\%$  = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0, b_1, b_2$  e  $b_3$  = Coeficientes da equação

Curva de regressão representando a relação Taxa de secagem (%) (kWh) em função do Tempo (h)





ANEXO 23. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM EM FUNÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

$$TUP = 582,0608 - 52,4265 * LN(WH)$$

$$R^2 = 0,99 \quad R^2 \text{ ajustado} = 0,98 \quad F(1,42) = 1603,4 \quad P < 0,00000$$

$$Syx = 6,0855 \quad Syx\% = 12,10\%$$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(45)	probabilidade
$b_0$	582,0608	13,24532	43,9446	0,000000
$b_1$	-52,4265	1,30927	-40,0426	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

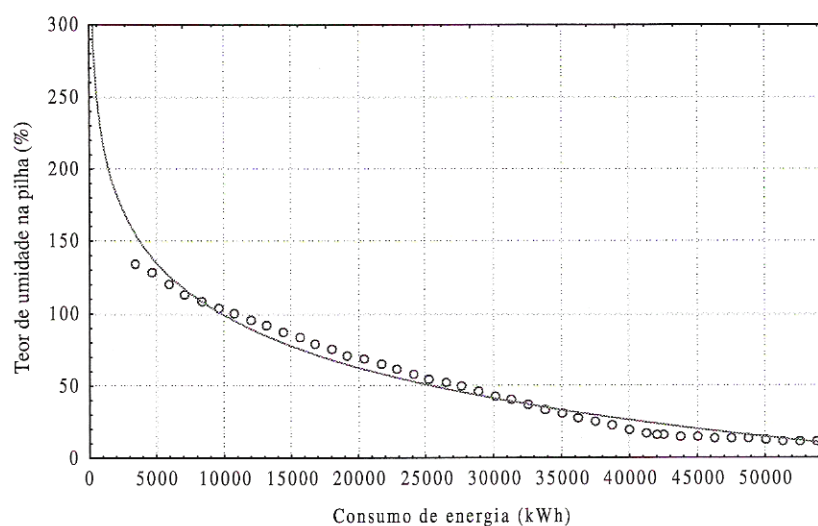
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$ , e  $b_1$ , = Coeficientes da equação

Curva de regressão representando a relação Teor de umidade na pilha (%) em função do Consumo de energia (kWh)



ANEXO 24. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 70°C COM 2 m/s E COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Variável	T	TUE	DT	TUP	TXS	WHsv	WHcv
T	1,00						
TUE	-0,98	1,00					
DT	0,10	-0,19	1,00				
TUP	-0,98	0,95	-0,03	1,00			
TXS	-0,84	0,88	0,03	0,86	1,00		
WHsv	1,00	-0,96	-0,95	-0,97	-0,86	1,00	
WHcv	0,98	-0,93	-0,92	-1,00	-0,91	0,98	1,00

Legenda:

T = Tempo (h)

TUE = Teor de umidade resistivo (%)

DT = Delta T

TUP = Teor de umidade gravimétrico (%)

TXS = Taxa de secagem (%U/h)

WHsv = Consumo de energia (Wh) sem variar velocidade

WHcv = Consumo de energia (Wh) com variação de velocidade

ANEXO 24. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 70°C COM 2 m/s E COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Variável	T	TUE	DT	TUP	TXS	WHsv	WHcv
T	1,00						
TUE	-0,98	1,00					
DT	0,10	-0,19	1,00				
TUP	-0,98	0,95	-0,03	1,00			
TXS	-0,84	0,88	0,03	0,86	1,00		
WHsv	1,00	-0,96	-0,95	-0,97	-0,86	1,00	
WHcv	0,98	-0,93	-0,92	-1,00	-0,91	0,98	1,00

Legenda:

T = Tempo (h)

TUE = Teor de umidade resistivo (%)

DT = Delta T

TUP = Teor de umidade gravimétrico (%)

TXS = Taxa de secagem (%U/h)

WHsv = Consumo de energia (Wh) sem variar velocidade

WHcv = Consumo de energia (Wh) com variação de velocidade

## ANEXO 25. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO

$$TXS=2,149241-0,008389*LN(t)$$

$R^2=0,99$                        $R^2$  ajustado=0,99                       $F(1,46)=4140,3$                        $p<0,0000$   
 $Syx=0,02756$                        $Syx\%=1,68\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(45)	probabilidade
$b_0$	2,149241	0,009406	228,4918	0,00
$b_1$	-0,008389	0,000130	-64,3453	0,00

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

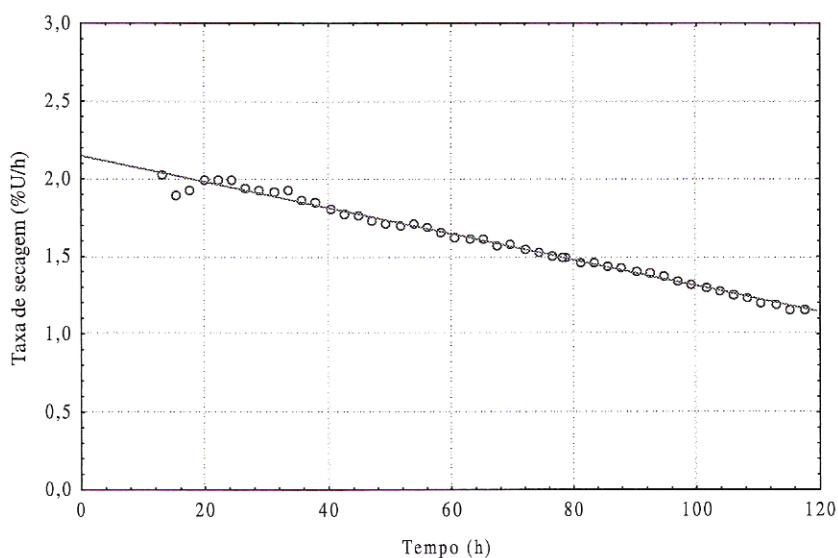
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$ , e  $b_1$ , = Coeficientes da equação

Curva de regressão representando a relação Taxa de secagem (%U/h) em função do Tempo (H)



ANEXO 26. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO

$$TUP=255,6860-51,4015*LN(t)$$

$R^2=0,96$        $R^2$  ajustado=0,96       $F(1,49)=1339,8$        $P<0,00000$   
 $Syx=7,3087$        $Syx\%=19,37\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(49)	Probabilidade
$b_0$	255,6860	5,602527	45,6376	0,000000
$b_1$	-51,4015	1,404262	-36,6039	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

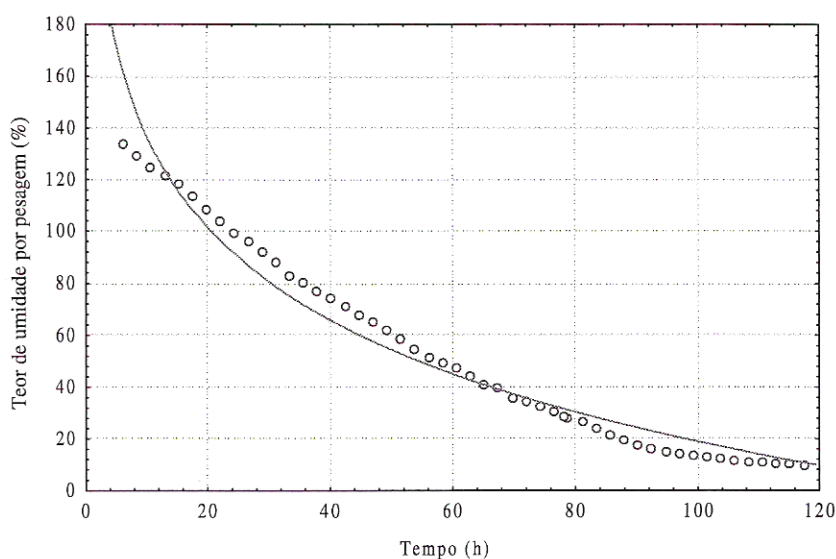
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$ , e  $b_1$ , = Coeficientes da equação

Curva de regressão representando a relação do teor de umidade por pesagem (%) em função do Tempo (h)



ANEXO 27. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/h) EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM (%)

$$TXS = 1,114143 + 0,014031 * TUP - 0,000057 * TUP^2$$

$R^2 = 0,97386195$        $R^2$  ajustado = 0,97270026       $F(2,45) = 838,31$   $p < 0,00000$

$Sy_x = 0,04298$        $Sy_x\% = 2,56\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(45)	Probabilidade
$b_0$	1,114143	0,017659	63,09255	0,000000
$b_1$	0,014031	0,000752	18,65032	0,000000
$b_2$	-0,000057	0,000006	-9,29145	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

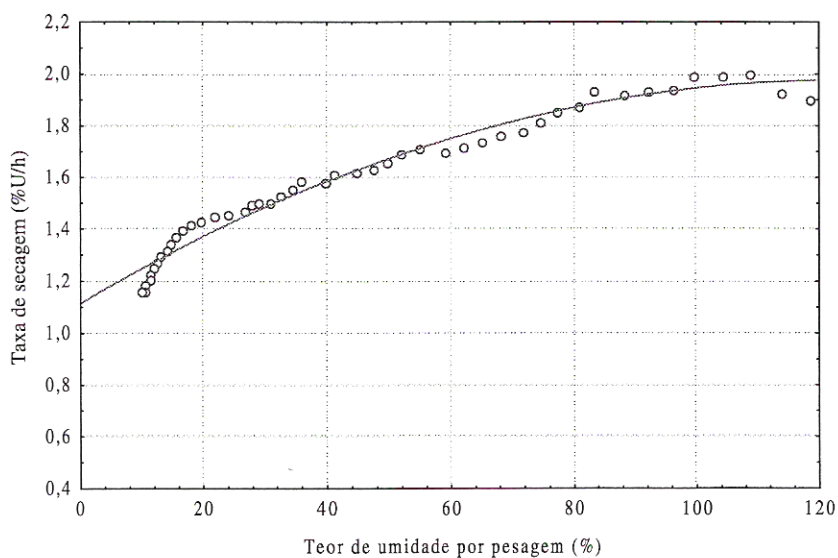
P = Probabilidade

$Sy_x$  = Erro Padrão da Estimativa

$Sy_x\%$  = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  = Coeficientes da equação

Curva de regressão representando a relação taxa de secagem (u%/h) em função do teor de umidade por pesagem (%)



ANEXO 28. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 70°C COM 4 m/s E SEM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Variável	T	TUE	DELT	TUP	TXS	WH	WHCV
T	1,00						
TUE	-0,96	1,00					
DELT	-0,92	0,86	1,00				
TUP	-0,99	0,96	0,89	1,00			
TXS	-0,72	0,84	0,61	0,78	1,00		
WH	1,00	-0,96	-0,92	-0,99	-0,72	1,00	
WHcv	0,98	-0,94	-0,88	-1,00	-0,77	0,98	1,00

Legenda:

T = Tempo (h)

TUE = Teor de umidade resistivo (%)

DT = Delta T

TUP = Teor de umidade gravimétrico (%)

TXS = Taxa de secagem (%U/h)

WHsv = Consumo de energia (Wh) sem variar velocidade

WHcv = Consumo de energia (Wh) com variação de velocidade

ANEXO 29. ANALISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO

$$TUP=247,1304-52,0044*LN(t)$$

$R^2=0,96$   
 $Syx=7,0580$

$R^2$  ajustado=0,96  
 $Syx\%=12,14\%$

$F(1,34)=910,30$

$p<,00000$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(34)	Probabilidade
$b_0$	247,1304	6,373468	38,7749	0,000000
$b_1$	-52,0044	1,723640	-30,1712	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

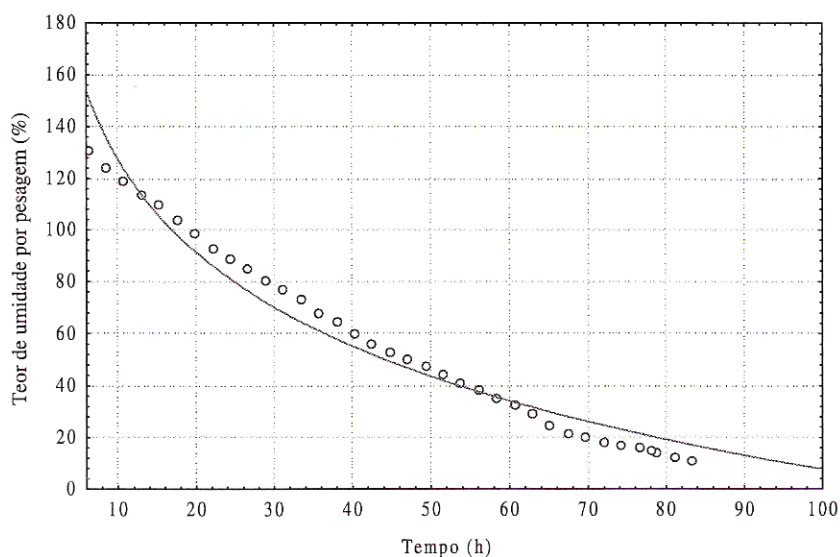
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$  e  $b_1$  = Coeficientes da equação

*Curva de regressão representando a relação do teor de umidade por pesagem (%) em função do Tempo (h)*





ANEXO 30. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEOR DA TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO

$$TXS=6,59484-1,16808*LN(t)$$

$R^2= 0,75$                        $R^2$  ajustado=0,74       $F(1,36)=109,08$        $p<,00000$   
 $Syx=0,47222$                        $Syx\%=18,66\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(36)	Probabilidade
$b_0$	6,59484	0,415866	15,8581	0,000000
$b_1$	-1,16088	0,111151	-10,4442	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

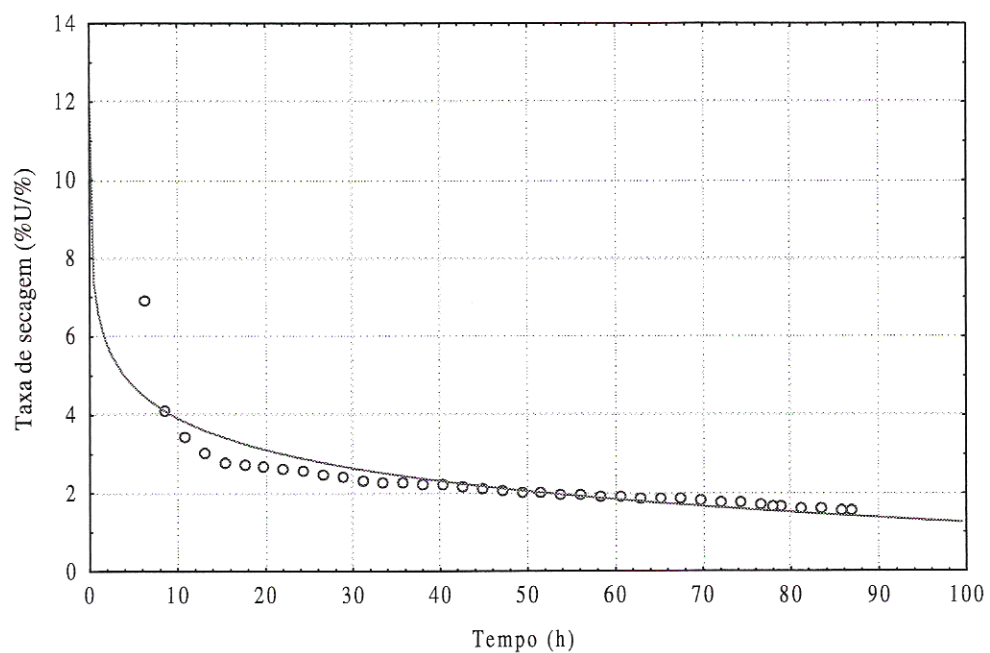
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$  e  $b_1$  = Coeficientes da equação

Curva de regressão representando a relação a taxa de secagem (%U/h) em função do Tempo (h)



ANEXO 31. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 70°C COM 4 m/s E COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Variável	T	TUP	TXS	WH
T	1,000000			
TUP	-0,982789	1,000000		
TXS	-0,934694	0,967446	1,000000	
WH	0,999988	-0,982195	-0,934148	1,000000

Legenda:

T = Tempo (h)

TUE = Teor de umidade resistivo (%)

DT = Delta T

TUP = Teor de umidade gravimétrico (%)

TXS = Taxa de secagem (%U/h)

WHsv = Consumo de energia (Wh) sem variar velocidade

WHcv = Consumo de energia (Wh) com variação de velocidade

## ANEXO 32. ANALISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM EM FUNÇÃO DO TEMPO

$$TXS=5,122588-0,783775*LN(t)$$

$R^2=0,97701167$        $R^2$  Ajustado= $0,97639036$        $F(1,37)=1572,5$        $p<0,00000$   
 $Syx=0,08552$        $Syx\%=3,85\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(37)	Probabilidade
$b_0$	5,122588	0,074377	68,8735	0,000000
$b_1$	-0,783775	0,019765	-39,6549	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

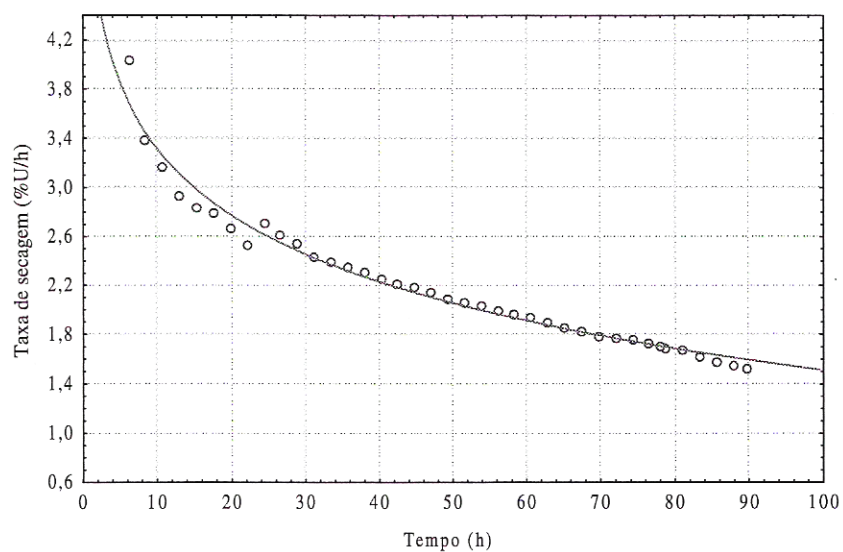
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$  e  $b_1$  = Coeficientes da equação

Curva de regressão representando a relação Taxa de secagem (%U/h) em função do Tempo (h)



ANEXO 33. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%) E O CONSUMO DE ENERGIA (WH)

$$TUP=594,1963-53,2772*LN(wh)cv$$

$$R^2=0,98 \quad R^2 \text{ ajustado}=0,97 \quad F(1,35) = 1488,0 \quad p<,00000$$

$$Syx=5,7213 \quad Syx\%=9,78\%$$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(35)	Probabilidade
b <sub>0</sub>	594,1963	13,94548	42,6085	0,000000
b <sub>1</sub>	-53,2772	1,38114	-38,5749	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

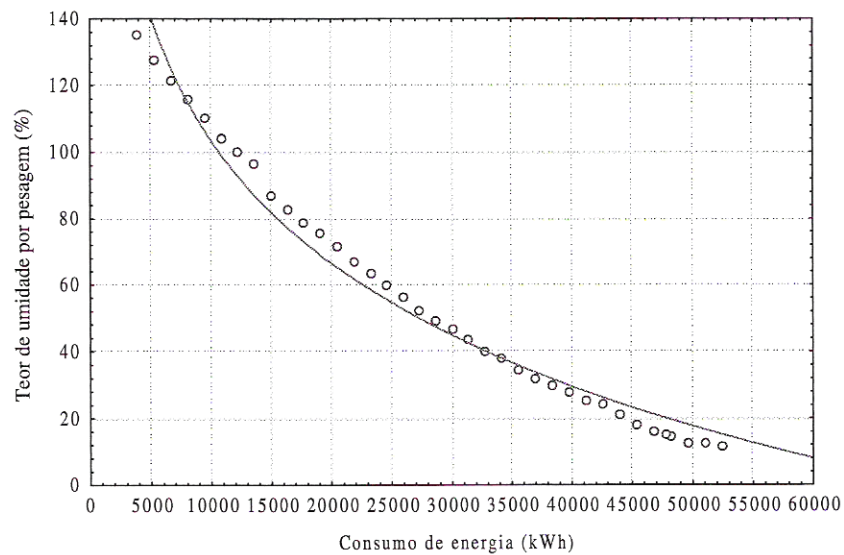
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

b<sub>0</sub> e b<sub>1</sub> = Coeficientes da equação

Curva de regressão representando a relação Teor de umidade na pilha (%) em função do Consumo de energia (kWh)



ANEXO 34. ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE A TAXA DE SECAGEM (U%/H) E O TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%)

$$TXS=1,620464+0,006460*TUP+0,000058*TUP^2$$

$R^2=0,95$                        $R^2$  ajustado=0,95       $F(2,34)=343,21$        $p<0,00000$   
 $Syx=0,12237$                        $Syx\%=10,19\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(34)	Probabilidade
$b_0$	1,620464	0,063279	25,60816	0,000000
$b_1$	0,006460	0,002297	2,81290	0,008099
$b_2$	0,000058	0,000017	3,48448	0,001378

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

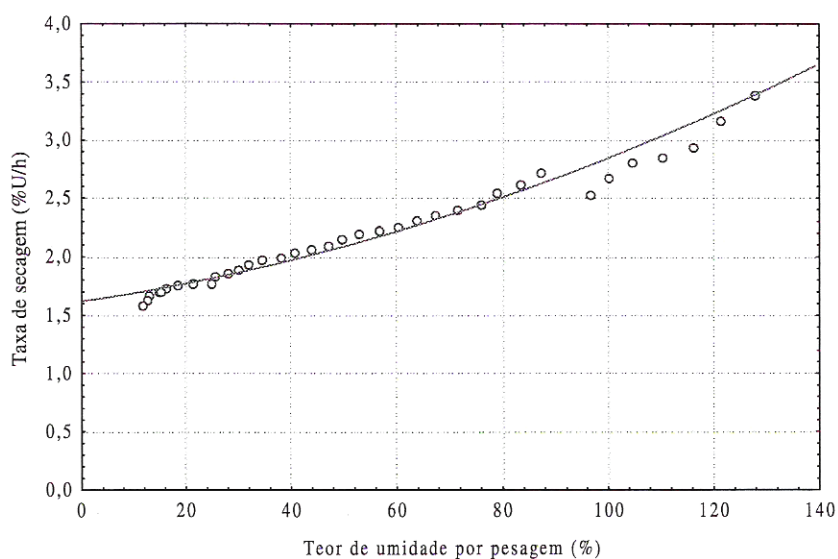
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  = Coeficientes da equação

Curva de regressão representando a relação taxa de secagem (u%/h) em função do teor de umidade por pesagem (%)



ANEXO 35. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 90°C COM 4 m/s E COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Variável	T	DELT	TUP	TXS	WH	WHCV
T	1,00					
DELT	-0,84	1,00				
TUP	-0,99	0,76	1,00			
TXS	-0,75	0,59	0,75	1,00		
WH	1,00	-0,84	-0,99	-0,75	1,00	
WHCV	0,98	-0,73	-1,00	-0,76	0,98	1,00

Legenda:

T = Tempo (h)

TUE = Teor de umidade resistivo (%)

DT = Delta T

TUP = Teor de umidade gravimétrico (%)

TXS = Taxa de secagem (%U/h)

WHsv = Consumo de energia (Wh) sem variar velocidade

WHcv = Consumo de energia (Wh) com variação de velocidade

ANEXO 36. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA TEOR DE UMIDADE POR PESAGEM (%) EM FUNÇÃO DO TEMPO (h)

$$TUP = 147,1656 - 2,0643 * t - 0,0611 * t^2 + 0,0010 * t^3$$

$R^2 = 0,99$        $R^2$  ajustado = 0,99       $F(3,30) = 13468,00$        $p < 0,0000$   
 $Syx = 1,1515$        $Syx\% = 1,88\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(30)	Probabilidade
b <sub>0</sub>	147,1656	1,599846	91,98732	0,000000
b <sub>1</sub>	-2,0643	0,207406	-9,95307	0,000000
b <sub>2</sub>	-0,0611	0,007649	-7,98373	0,000000
b <sub>3</sub>	0,0010	0,000084	11,74247	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

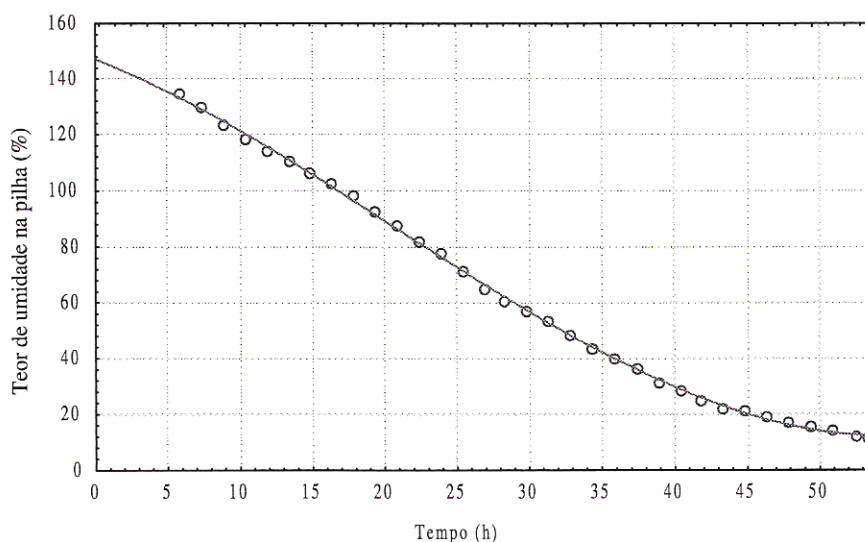
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> e b<sub>3</sub> = Coeficientes da equação

*Curva de regressão representando a relação do teor de umidade por pesagem (%) em função do Tempo (h)*



ANEXO 37. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/h) EM FUNÇÃO DO TEMPO (h)

$$TXS=147,1656-2,0643*t-0,0611*t^2+0,0010*t^3$$

$R^2=0,93$        $R^2$  ajustado=0,92       $F(3,34)=53,887$        $p<,00000$   
 $Syx=0,27287$        $Syx\%=6,69\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(34)	Probabilidade
b <sub>0</sub>	6,156156	0,337723	18,22840	0,000000
b <sub>1</sub>	-0,271552	0,040535	-6,69918	0,000000
b <sub>2</sub>	0,007960	0,001379	5,77359	0,000002
b <sub>3</sub>	-0,000076	0,000014	-5,50124	0,000004

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

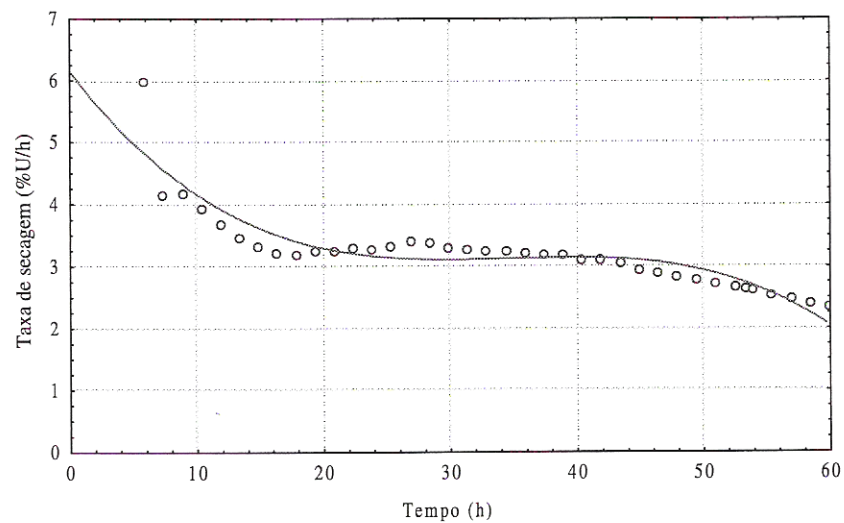
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> e b<sub>3</sub> = Coeficientes da equação

Curva de regressão representando a relação taxa de secagem (U%/h) em função do tempo (h)





ANEXO 38. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO CONSUMO DE ENERGIA SEM USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM FUNÇÃO DO TEMPO

$$WH=137,9742+536,9391*t$$

$R^2=0,99$   
 $Syx=54,137$

$R^2$  ajustado=0,99  
 $Syx\%=0,33\%$

$F(1,32)=7172E2$

$p<0,0000$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(32)	Probabilidade
$b_0$	137,9742	21,45265	6,4316	0,000000
$b_1$	536,9391	0,63402	846,8799	0,000000

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$  e  $b_1$  = Coeficientes da equação

ANEXO 39. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO CONSUMO DE ENERGIA COM USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM FUNÇÃO DO TEMPO

$$WHCV = -1660,94 + 756,98 * t - 5,99 * t^2$$

$R^2=0,99$                        $R^2$  ajustado=0,99       $F(2,35)=6668,6$        $p<0,0000$   
 $Syx=320,69$                        $Syx\%=2,09\%$

	Coeficientes	Erro Padrão	t(35)	Probabilidade
$b_0$	-1660,94	222,9417	-7,4501	0,000000
$b_1$	756,98	15,3657	49,2640	0,000000
$b_2$	-5,99	0,2277	-26,2992	0,000000

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

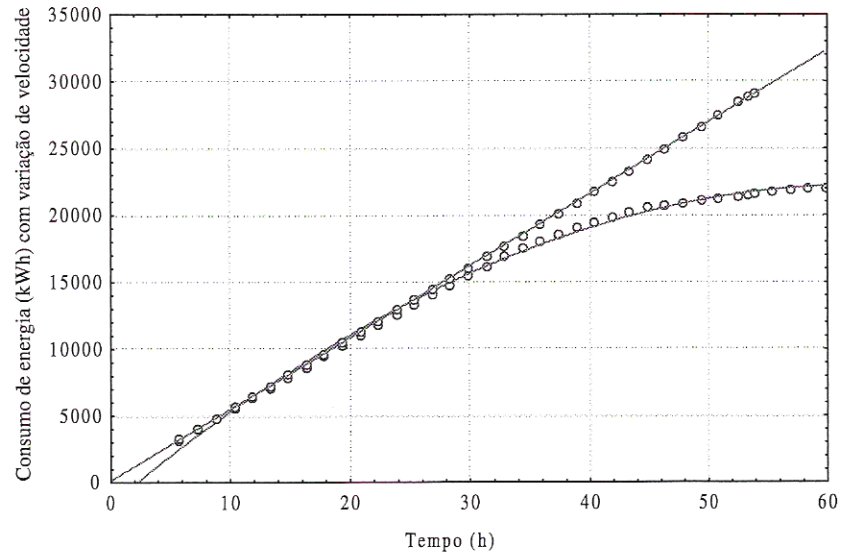
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

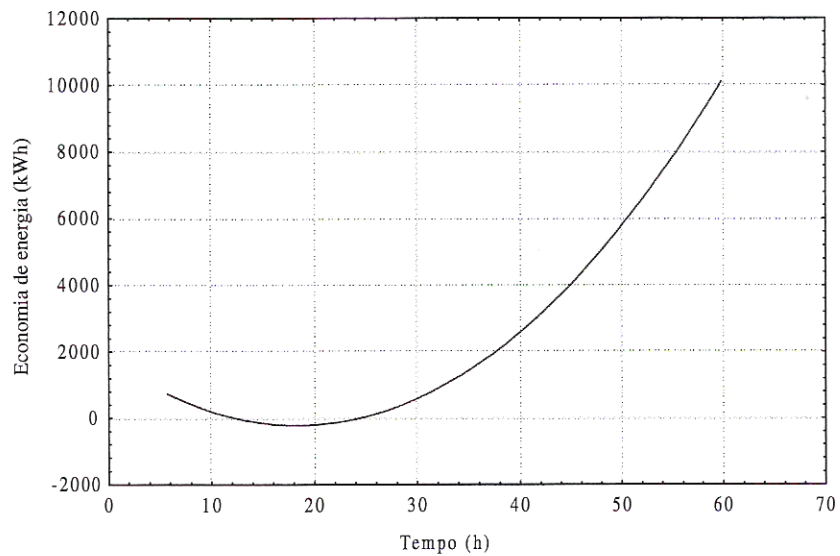
Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

$b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  = Coeficientes da equação

Curvas de regressão representando as relações Consumo de energia (kWh) em função do Tempo (horas)  $WH = WH = 137,9742 + 536,9391 * t$  e  $WHCV = -1660,94 + 756,98 * t - 5,99 * t^2$



Curva da equação diferencial representando a economia de energia (kWh) em função do Tempo (horas)  $-EE = 1798,91 - 220,04 * T + 5,9952 * t^2$



ANEXO 40. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 90°C COM 4 m/s E SEM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Variável	T	DELT	TUP	TXS	WH
T	1,000000				
DELT	-0,255747	1,000000			
TUP	-0,998082	0,213523	1,000000		
TXS	-0,674290	0,225193	0,676427	1,000000	
WH	0,999978	-0,259297	-0,997679	-0,673815	1,000000

Legenda:

T = Tempo (h)

TUE = Teor de umidade resistivo (%)

DT = Delta T

TUP = Teor de umidade gravimétrico (%)

TXS = Taxa de secagem (%U/h)

WHsv = Consumo de energia (Wh) sem variar velocidade

WHcv = Consumo de energia (Wh) com variação de velocidade

ANEXO 41. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/h) EM FUNÇÃO DO TEMPO (h)

$$TXS=4,266221-0,142668*t+0,004282*t^2-0,000041*t^3$$

$$R^2=0,79165027$$

$$Syx=0,14026$$

$$R^2 \text{ ajustado}=0,77326647$$

$$Syx\%=5,14\%$$

$$F(3,34)=43,062$$

$$p<0,00000$$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(34)	Probabilidade
b <sub>0</sub>	4,266221	0,173596	24,57554	0,000000
b <sub>1</sub>	-0,142668	0,020836	-6,84723	0,000000
b <sub>2</sub>	0,004282	0,000709	6,04187	0,000001
b <sub>3</sub>	-0,000041	0,000007	-5,76611	0,000002

Legenda:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

$R^2$  Ajustado = Coeficiente de determinação ajustado

F = Valor de "F" da Regressão

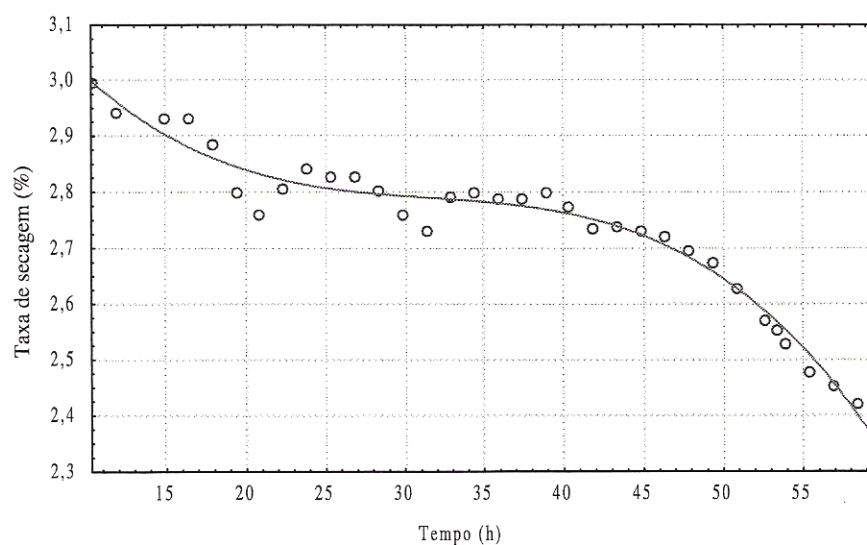
P = Probabilidade

Syx = Erro Padrão da Estimativa

Syx% = Erro Padrão da Estimativa em porcentagem

b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> e b<sub>3</sub> = Coeficientes da equação

Curva de regressão representando a relação taxa de secagem (U%/h) em função do tempo (h)



ANEXO 42. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%) EM FUNÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA (kWh)

$$TUP = 150,6478 - 0,0048 * LN(t)$$

$$R^2 = 0,99$$

$$R^2 \text{ ajustado} = 0,99$$

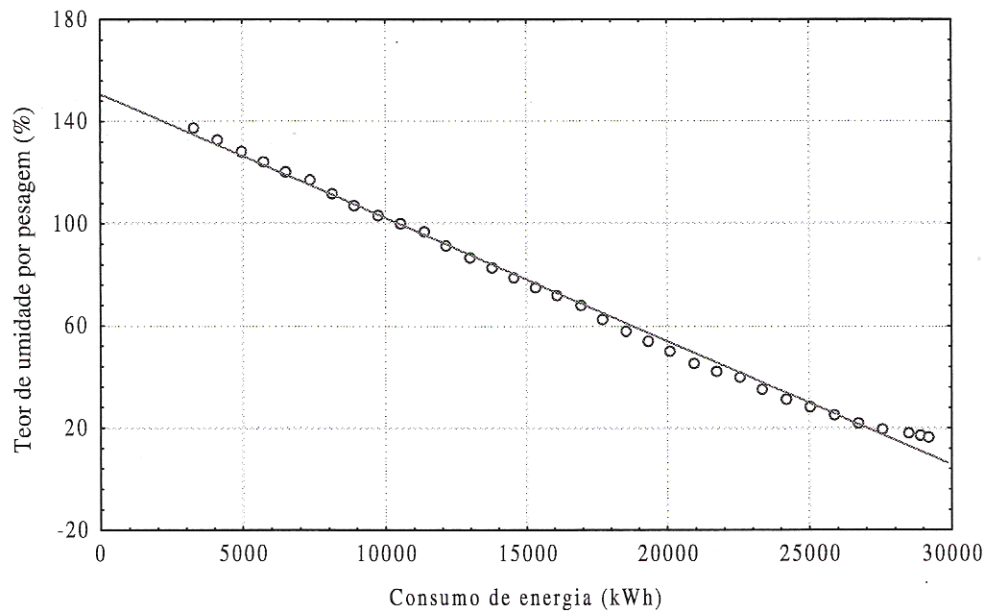
$$F(1,32) = 6869,0 \text{ p} < 0,00000$$

$$Syx = 2,6733$$

$$Syx \% = 4,13\%$$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(32)	Probabilidade
b <sub>0</sub>	150,6478	1,066563	141,2461	0,000000
b <sub>1</sub>	-0,0048	0,000058	-82,8794	0,000000

*Curva de regressão representando a relação teor de umidade na pilha (%h) em função do consumo de energia (wh)*



ANEXO 43. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/H) EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%)

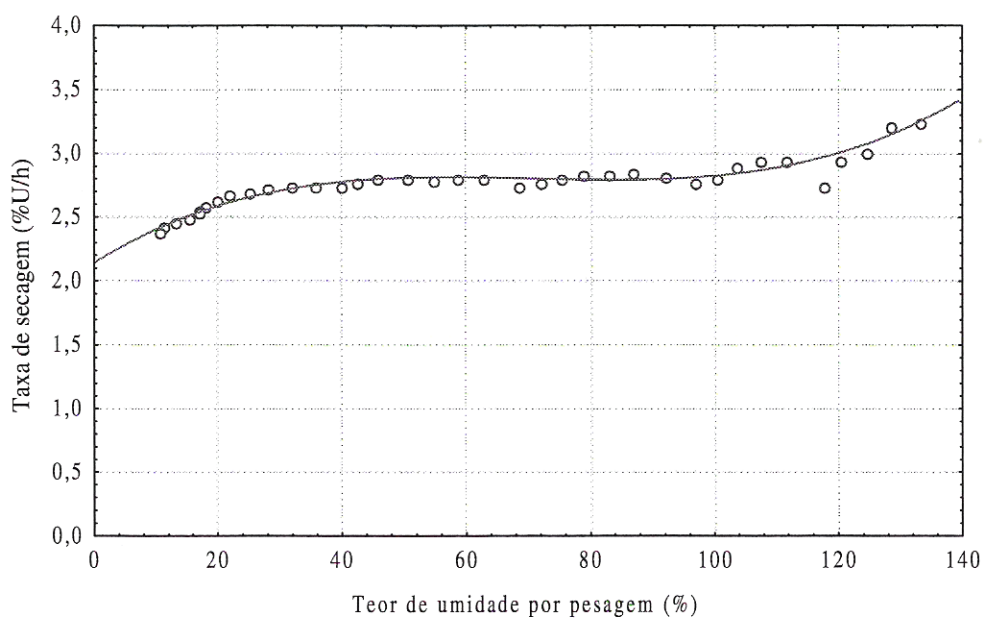
$$TXS=2,141805+0,030317*TUP-0,000445*TUP^2+0,000002*TUP^3$$

$R^2=0,92$                        $R^2$  ajustado =0,91     $F(3,33)=122,35$   $p<,00000$

$Syx=0,05533$                        $Syx\%=2,07\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(33)	Probabilidade
b <sub>0</sub>	2,141805	0,049092	43,62822	0,000000
b <sub>1</sub>	0,030317	0,003117	9,72707	0,000000
b <sub>2</sub>	-0,000445	0,000051	-8,66917	0,000000
b <sub>3</sub>	0,000002	0,000000	8,61806	0,000000

*Curva de regressão representando a relação entre a taxa de secagem (U%/h) em função do teor de umidade na pilha (%h)*



## ANEXO 44. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 90°C COM 2 M/S E SEM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Variável	T	DELT	TUP	TXS	WH
T	1,000000				
DELT	-0,672801	1,000000			
TUP	-0,989925	0,588551	1,000000		
TXS	-0,854355	0,668569	0,830353	1,000000	
WH	0,999973	-0,675399	-0,989280	-,855531	1,000000



## ANEXO 44. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 90°C COM 2 M/S E SEM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Variável	T	DELT	TUP	TXS	WH
T	1,000000				
DELT	-0,672801	1,000000			
TUP	-0,989925	0,588551	1,000000		
TXS	-0,854355	0,668569	0,830353	1,000000	
WH	0,999973	-0,675399	-0,989280	-,855531	1,000000

ANEXO 45. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%) EM FUNÇÃO DO TEMPO (H)

$$TUP=147,7676-2,1132*t-0,0299*t^2+0,0005*t^3$$

R<sup>2</sup>=0,99

R<sup>2</sup> ajustado=0,99

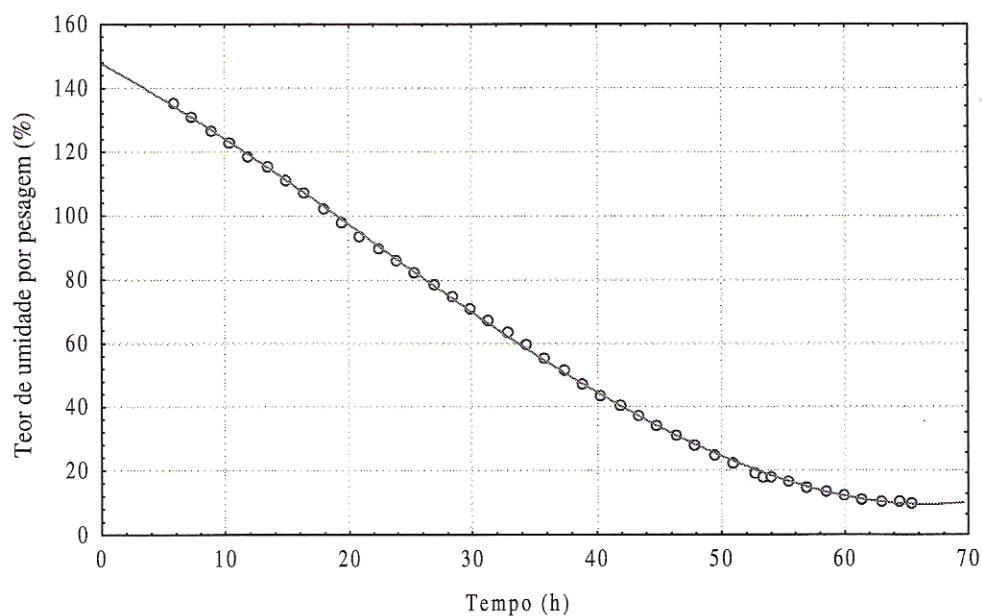
F(3,38)=47228, p<0,0000

Syx=0,69152

Syx%=1,15%

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(38)	Probabilidade
b <sub>0</sub>	147,7676	0,768498	192,2810	0,000000
b <sub>1</sub>	-2,1132	0,085236	-24,7928	0,000000
b <sub>2</sub>	-0,0299	0,002666	-11,2086	0,000000
b <sub>3</sub>	0,0005	0,000025	18,5598	0,000000

*Curva de regressão representando a relação teor de umidade na pilha (%h) em função do tempo (h)*



ANEXO 46. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/H) EM FUNÇÃO DO TEMPO (H)

$$TXS=3,71944-0,087663*t+0,002433*t^2-0,000023*t^3$$

$R^2=0,98$

$R^2$  ajustado=0,97

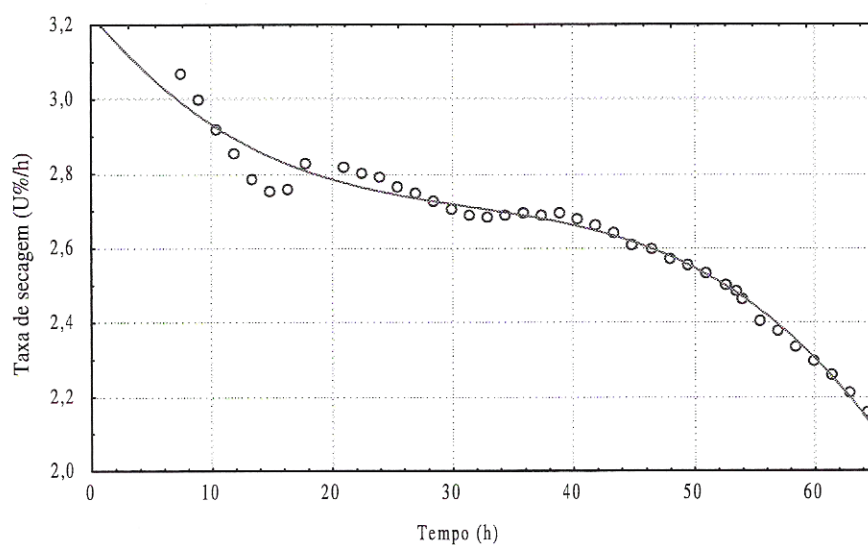
$F(3,36)=558,59$   $p<,00000$

$Syx=0,03338$

$Syx\%=1,30\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(38)	Probabilidade
$b_0$	3,229212	0,044746	72,16810	0,000000
$b_1$	-0,039550	0,004776	-8,28077	0,000000
$b_2$	0,001098	0,000145	7,55774	0,000002
$b_3$	-0,000012	0,000001	-8,80531	0,000002

Curva de regressão representando a relação taxa de secagem (U%/h) em função do tempo (h)



## ANEXO 47. MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS OBSERVADAS NO PROGRAMA DE 90°C COM 2 m/s E COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Variável	T	TUP	TXS	WH
T	1,000000			
TUP	-0,990613	1,000000		
TXS	-0,837668	0,866070	1,000000	
WH	0,999976	-0,990282	-0,838224	1,000000

ANEXO 48. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/h) EM FUNÇÃO DO TEMPO (H)

$$TXS=4,385952-0,109430*t+0,002255*t^2-0,000017*t^3$$

R<sup>2</sup>=0,99

R<sup>2</sup> ajustado=0,98

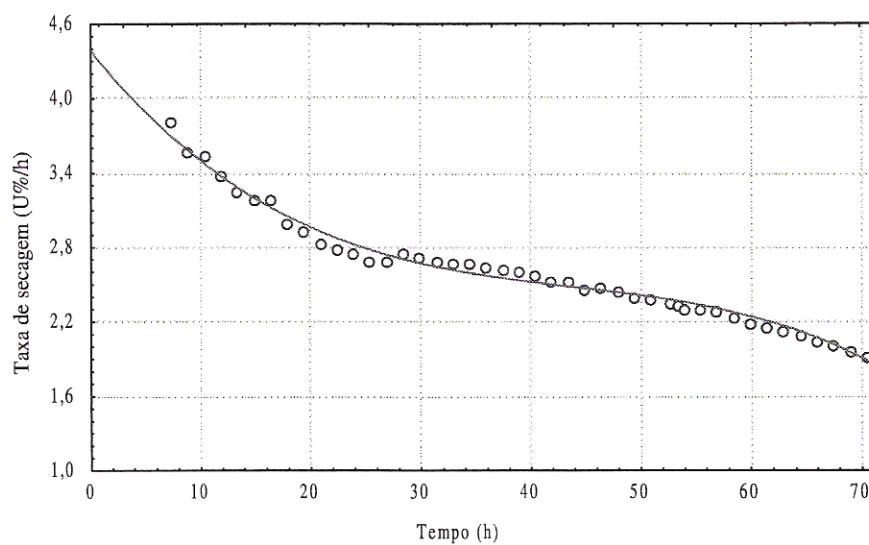
F(1,43)=971,65 p<0,00000

Syx=0,05517

Syx%=2,12%

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(41)	Probabilidade
b <sub>0</sub>	4,385952	0,065989	66,4653	0,000000
b <sub>1</sub>	-0,109430	0,006505	-16,8226	0,000000
b <sub>2</sub>	0,002255	0,000182	12,3597	0,000000
b <sub>3</sub>	-0,000017	0,000002	-11,2681	0,000000

Curva de regressão representando a relação taxa de secagem (U%/h) em função do tempo (h)



ANEXO 49. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%) EM FUNÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA (WH)

$$TUP=622,1511-57,7910*LN(wh)$$

$R^2=0,96$

$R^2$  ajustado=0,96

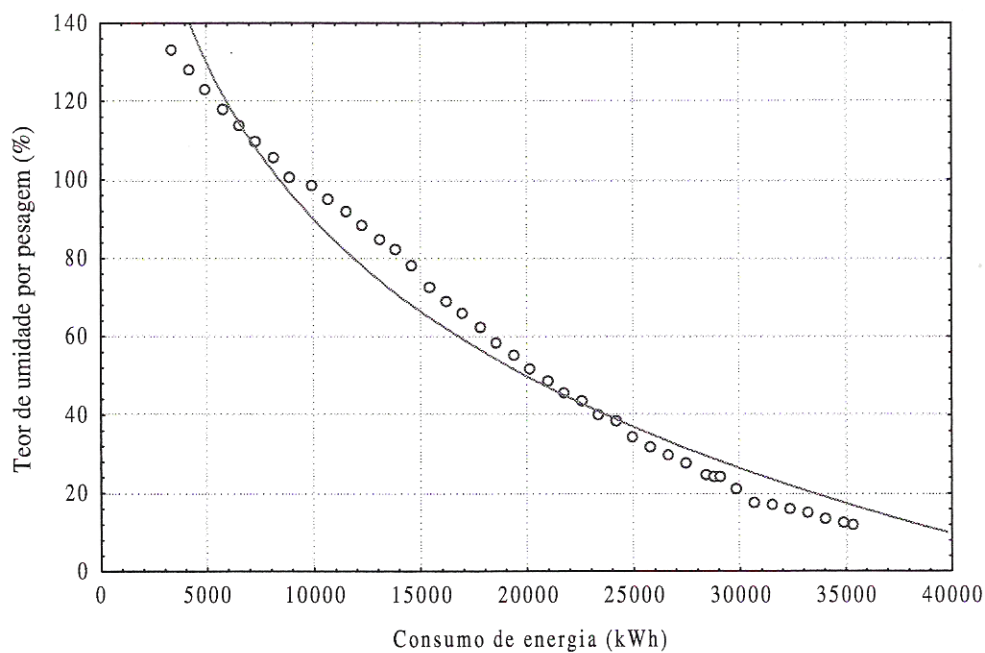
$F(1,40)=1092,9$   $p<0,00000$

$Syx=7,0972$

$Syx\%=12,65\%$

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(40)	Probabilidade
$b_0$	622,1511	17,02888	36,5351	0,000000
$b_1$	-57,7910	1,74809	-33,0595	0,000000

Curva de regressão representando a relação teor de umidade na pilha (%h) em função do consumo de energia (Wh)



ANEXO 50. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA TAXA DE SECAGEM (U%/H) EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NA PILHA (%)

$$TXS=1,627322+0,040707*TUP-0,000579*TUP^2+0,000003*TUP^3$$

R<sup>2</sup>=0,99

R<sup>2</sup> ajustado=0,98

F(3,41)=1015,5 p<,00000

Syx=0,05398

Syx%=2,08%

Variável	Coefficientes	Erro Padrão	t(41)	Probabilidade
Intercept	1,627322	0,039647	41,0451	0,000000
TUP	0,040707	0,002705	15,0489	0,000000
TUP2	-0,000579	0,000047	-12,2000	0,000000
TUP3	0,000003	0,000000	13,0511	0,000000

Curva de regressão representando a relação taxa de secagem (U%/h) em função do teor de umidade na pilha (%h)

