

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
MURILO ALVES DE MELO

**ANÁLISE DA SECAGEM E DOS SECADORES DE *PINUS* DA REGIÃO  
SERRANA DE SANTA CATARINA PARA APRIMORAMENTO**

LAGES  
2018

MURILO ALVES DE MELO

**ANÁLISE DA SECAGEM E DOS SECADORES DE *PINUS* DA REGIÃO  
SERRANA DE SANTA CATARINA PARA APRIMORAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Centro Universitário  
UNIFACVEST como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Esp. Alisson Ribeiro Oliveira  
Coorientador (a).            Prof. Esp.  
Tamara Zanette

LAGES  
2018

MURILO ALVES DE MELO

**ANÁLISE DA SECAGEM E DOS SECADORES DE *PINUS* DA REGIÃO  
SERRANA DE SANTA CATARINA PARA APRIMORAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Centro Universitário  
UNIFACVEST como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Esp. Alisson Ribeiro Oliveira  
Coorientador (a).      Prof. Esp.  
Tamara Zanette

Lages, SC, \_\_\_ de dezembro de 2018. Nota: \_\_\_\_\_

**Prof. Esp. Alisson Ribeiro de Oliveira**

---

**Prof. Doc. Rodrigo Botan**

LAGES  
2018

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta pesquisa as duas pessoas mais importantes da minha vida, a minha mãe Elza de Fatima Alves e ao meu pai Abdon Neto de Melo sem eles não seria nem a metade da pessoa que sou hoje.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e a minha família que sempre estiveram ao meu lado, ao Centro Universitário Unifacvest por ter disponibilizado o estágio na TECH a todos os funcionários e estagiários da TECH, João Lucas, Sérgio, Diego, Eduardo, Acacio, Gabriel, que em cooperação mutua conseguimos terminar nossas pesquisas.

Agradeço aos meus amigos do ônibus da Penha, do IBGE, da faculdade, em especial Orli Gomes, meu parceiro de trabalhos acadêmicos, as minhas amigas Tainara Santos e Bárbara Marjorie por me alegrarem e aconselharem e principalmente a umas das pessoas mais incríveis que eu tive o prazer de conhecer, minha grande amiga Suelen Branco, sem seus conselhos e ideias de mudanças a pesquisa não teria o mesmo êxito.

Agradeço a todo o corpo docente da área das engenharias que fomentou meu conhecimento ao longo destes cinco anos de faculdade a professora Tamara Zanette que aceitou este desafio de me orientar na elaboração deste trabalho, sem ela provavelmente a qualidade e desenvolvimento não teria sido a mesma e também a todas as empresas que se dispuseram a me auxiliar e repassar seus dados.

# **ANÁLISE DA SECAGEM E DOS SECADORES DE *PINUS* DA REGIÃO SERRANA DE SANTA CATARINA PARA APRIMORAMENTO**

Murilo Alves de Melo<sup>1</sup>

Tamara Zanette<sup>2</sup>

## **RESUMO**

A sociedade serrana catarinense se desenvolveu entorno da indústria madeireira então o estudo dos secadores de madeira serrada pode não só ajudar no melhoramento de um processo de grande significância para a indústria local, como também é uma oportunidade para estudo e análise de trocadores de calor, fluxo de fluidos e isolamento térmica. As propriedades da madeira com maior influência no processo são a capacidade de adquirir umidade de forma espontânea e o ponto de saturação de fibras. A secagem ocorre através da passagem de um fluido secante pelo material ocasionando na perda de umidade do mesmo pelo processo de convecção e condução podendo ser ao ar livre, onde se deixa a madeira em pilhas ou varais em grandes pátios ou por secadores, que possuem como princípio básico de funcionamento a circulação forçada do ar aquecido por um conjunto de trocadores de calor entre as pilhas de madeira. Tendo como objetivo o aprimoramento do processo de secagem e dos secadores, esta pesquisa foi embasada em bibliografias de renomados estudiosos da indústria da madeira, simulação de secagem ao ar livre, de questionários e entrevistas com empresas regionais envolvidas no setor madeireiro. Foi possível observar as particularidades da secagem ao ar livre e discrepâncias do tempo para atingir os teores de umidade desejado e das similaridades estruturais dos secadores de madeira. Após o estudo dos dados e bibliografias constatou-se que a implementação de cobertura, materiais escuros e drenagem no pátio da secagem ao ar livre podem melhorar na qualidade final e tempo de perda de umidade das peças de madeira, e nos secadores o uso de curvas de secagem de altas temperaturas, uniformidade nas pilhas de madeira, implantação de inversores de frequência, uso de controle do processo e o dimensionamento correto dos mesmos podem trazer benefícios tanto em questões econômicas, diminuindo gastos de consumo de energia e aumento de produção, como em qualidade.

Palavras-chave: Indústria madeireira. Aprimoramento. Secadores.

---

<sup>1</sup> Acadêmico da 10º fase de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Unifacvest.

<sup>2</sup> Pós-graduada em Engenharia e Gestão da Produção pelo Centro Universitário Cesumar – Unicesumar. Graduada em Engenharia Química pela Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL.

# **ANALYSIS OF THE DRYING AND OF THE PINUS' DRYERS OF THE HIGHLAND REGION OF SANTA CATARINA FOR IMPROVEMENT**

## **ABSTRACT**

Murilo Alves de Melo<sup>3</sup>

Tamara Zanette<sup>4</sup>

Santa Catarina's highland society was developed around the timber industry, so the study of lumber dryers cannot just help improving a process of great significance for the local industry, but it's also an opportunity to study and analyze heat exchangers, fluid flows and heat insulation. The properties of wood with the greatest influence in this process are the ability to acquire moisture spontaneously and the saturation point of fibers. The drying process occurs through the passage of a secant fluid by the material causing its moisture loss by convection or conduction, it can be outdoors, leaving the wood in piles or rods in large courtyards or by dryers, that have as operations' basic principles the forced circulation of the air heated by a set of heat exchangers between the piles of wood. Being the objective of this research the improvement of the drying process and dryers, it was based on the wood industry's renowned scholars' bibliographies, simulation of outdoor drying, questionnaires and interviews with regional companies involved in the timber sector. With it, it was possible to observe the particularities of the outdoor drying and time discrepancies to achieve the desired moisture content and the structural similarities of the wood dryers. After the study of data and bibliographies it was verified that implementation of coverage, dark materials and drainage in the outdoor drying patio can improve the final quality and time of moisture loss of the wood parts and in the dryers the use of curves of drying of high temperatures, uniformity in wood piles, implantation of frequency inverters, use of process control and the correct sizing can bring benefits both in economic issues, decreasing consumption expenditures of energy and increased production, as in quality.

**Keywords:** Timber industry. Improvement. Dryers

---

<sup>3</sup> Academic of the 10th phase of Mechanical Engineering at the University Center Unifacvest.

<sup>4</sup> Post-graduated in Engineering of Production and Management at the University Center Cesumar – Unicesumar. Graduated in Chemical Engineering from South's University of Santa Catarina-Unisul.

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 Teor de umidade .....	20
Equação 2 Fórmula para teor de umidade quando não se sabe o peso da água na madeira. ....	20
Equação 3 Para peso seco da madeira. ....	20
Equação 4 Para o teor máximo de umidade. ....	21
Equação 5 Umidade de equilíbrio. ....	24
Equação 6 Umidade relativa em porcentagem. ....	24
Equação 7 Calor específico da madeira de 0°C.....	26
Equação 8 Calor específico. ....	26
Equação 9 Condutividade térmica no plano x. ....	27
Equação 10 Condutividade térmica. ....	27
Equação 11 Equação empírica de McLean da condutividade térmica para umidade menor de 40% .....	28
Equação 12 Equação empírica de McLean para umidade acima de 40%. ....	28
Equação 13 Condutividade térmica longitudinal .....	28
Equação 14 Difusividade térmica. ....	29
Equação 15 Variação de comprimento. ....	30
Equação 16 Umidade inicial da madeira .....	45
Equação 17 Média aritmética .....	46
Equação 18 Resistência térmica na condução .....	47
Equação 19 Equação empírica de Churchill-Chu.....	47
Equação 20 Número de Prandtl .....	47
Equação 21 Número de Rayleigh .....	48
Equação 22 Coeficiente de expansão térmica .....	48
Equação 23 Resistência na convecção.....	48
Equação 24 Perda de calor na parede .....	48
Equação 25 volume total da massa de água por ar seco .....	49
Equação 26 Equação da energia para fluidos compressíveis .....	49
Equação 27 potência.....	49
Equação 28 Rotação do motor.....	49
Equação 29 rotação específica.....	50
Equação 30 Coeficiente de pressão .....	50
Equação 31 Diâmetro externo .....	50
Equação 32 número de pás .....	50

Equação 33	Altura do distribuidor.....	50
Equação 34	Relação de cubo .....	50
Equação 35	Diâmetro interno .....	50
Equação 36	Vazão para o ponto de máximo rendimento para distribuidor fixo de rotor-helice .....	51
Equação 37	Passo interno .....	51
Equação 38	comprimento da coroa do perfil no diâmetro interno .....	51
Equação 39	Velocidade meridional média .....	51
Equação 40	Velocidade tangencial no diâmetro interno .....	51
Equação 41	Componente da velocidade absoluta na direção tangencial no diâmetro interno. ....	51
Equação 42	Ângulo que a direção do escoamento não perturbado forma com a direção tangencial no diâmetro interno .....	52
Equação 43	Velocidade relativa do escoamento não perturbado no diâmetro interno .....	52
Equação 44	Coefficiente de sustentação do perfil no diâmetro interno.....	52
Equação 45	Diâmetros das seções .....	52
Equação 46	Velocidades tangenciais.....	52
Equação 47	Componentes da velocidade absoluta na direção tangencial .....	52
Equação 48	Ângulos que a direção do escoamento não perturbado forma com a direção tangencial.....	53
Equação 49	Velocidade relativa do escoamento não perturbado .....	53
Equação 50	Passos sem considerar a espessura das pás.....	53
Equação 51	Comprimento em verdadeira grandeza da corda dos perfis.....	53
Equação 52	Força que atua na pá no diâmetro médio $0,3.H$ .....	53
Equação 53	Momento fletor .....	53
Equação 54	Espessura para o diâmetro interno .....	54
Equação 55	Espessura para o diâmetro externo .....	54
Equação 56	Espessura para os demais diâmetros .....	54
Equação 57	Fator de engrossamento ou afinamento para diâmetro interno.....	54
Equação 58	Ordenada superior dos perfis em seu centro de gravidade perfil interno .....	54
Equação 59	Fator de engrossamento ou afinamento diâmetro externo .....	54
Equação 60	Ordenada superior do perfil em seu centro de gravidade do perfil externo.....	54
Equação 61	Ordenadas superiores dos demais perfis.....	55
Equação 62	Ordenadas máxima do perfil interno .....	55
Equação 63	Ordenada máxima do perfil externo .....	55
Equação 64	Ordenada máxima dos demais perfis .....	55

Equação 65 Ângulos de escorregamento.....	55
Equação 66 Coeficientes de sustentação considerando o arrasto .....	55
Equação 67 Razão do coeficiente de sustentação que considera o arrasto e a influência de uma pá sobre a outra e o que considera somente o arrasto.....	56
Equação 68 Coeficiente de sustentação considerando o arrasto e a influência de uma pá sobre a outra .....	56
Equação 69 Ângulos de ataque.....	56
Equação 70 Ângulos que a reta paralela ao eixo x passa no centro de gravidade do perfil .....	56
Equação 71 Ângulos do escoamento não perturbado na entrada do rotor.....	56
Equação 72 Rendimento dos perfis não considerando as perdas junto aos diâmetros interno e externo .....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representação dos tipos de águas na madeira.....	16
Figura 2 Representação das fases da adsorção na madeira .....	18
Figura 3 Histerese da sorção.....	18
Figura 4 Gráfico da relação temperatura-umidade de equilíbrio e umidade relativa. ....	26
Figura 5 Sentido do fluxo de calor em determinado objeto. ....	29
Figura 6 Principais defeitos ocasionados pela secagem. ....	37
Figura 7 Caldeira usada tipicamente na região do Mato Grosso no processo de aquecimento. .....	39
Figura 8 representação vertical e horizontal com seus perfis de uma pá .....	77
Figura 9 Pilhas de madeira .....	106
Figura 10 Varais para secagem.....	106
Figura 11 Caldeira típica da região serrana .....	107
Figura 12 Secador de alumínio .....	107
Figura 13 Ventiladores dos secadores .....	108
Figura 14 Trocadores de Calor dos secadores .....	108
Figura 15 Tipos de perfis.....	109
Figura 16 Elementos para dimensionamento de Rotores de Hélices e Kaplan .....	110
Figura 17 Elementos para dimensionamento de bombas e ventiladores axiais.....	111
Figura 18 Coeficiente de sustentação, perfis e ângulos de ataque correlacionados .....	112
Figura 19 Gráfico de diversos perfis em curvas polares .....	113
Figura 20 Dimensões dos perfis .....	114

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Média das perdas de massa diárias.....	64
Gráfico 2 Gráfico do erro padrão. ....	65

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Tempo de secagem estimado.....	44
Quadro 2 Índices climatológicos de Lages.....	60
Quadro 3 Perda de massa diária da pilha da madeira.....	64
Quadro 4 Desvio padrão das madeiras na pilha .....	65
Quadro 5 Propriedades térmicas de alguns materiais isolantes.....	67
Quadro 6 Dados de construção quanto ao número de ventiladores.....	72
Quadro 8 Programa de Secagem para <i>Pinus Taeda/ Ellioti</i> com 11mm de espessura .....	90
Quadro 9 Programa de Secagem para <i>Pinus Taeda/Ellioti</i> com 15mm de espessura .....	91
Quadro 10 Curva de secagem para <i>Pinus spp</i> com 25 mm de espessura .....	91
Quadro 11 Programa de secagem para <i>Pinus Taeda</i> 36 mm de espessura.....	92
Quadro 12 Programa de secagem a altas temperaturas para <i>Pinus Ellioti</i> 12,5 mm de espessura .....	92

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>16</b>
2.1 A água na madeira .....	16
2.2 Ponto de saturação de fibras .....	17
2.3 Adsorção .....	17
2.4 Movimentação da água .....	19
2.5 Umidade.....	19
2.6 Métodos de medição de umidade .....	22
<b>2.6.1 Método pela secagem em estufa.....</b>	<b>22</b>
<b>2.6.2 Método da destilação .....</b>	<b>22</b>
<b>2.6.3 Método da titulação .....</b>	<b>22</b>
<b>2.6.4 Método por medidores elétricos .....</b>	<b>23</b>
<b>2.6.5 Método higrométrico .....</b>	<b>23</b>
<b>2.6.6 Método por radiação nuclear.....</b>	<b>23</b>
2.7 Umidade de equilíbrio .....	24
2.8 Propriedades térmicas da madeira .....	26
<b>2.8.1 Calor Específico.....</b>	<b>26</b>
<b>2.8.2 Condutividade Térmica .....</b>	<b>27</b>
<b>2.8.3 Difusividade térmica.....</b>	<b>29</b>
<b>2.8.4 Expansão térmica .....</b>	<b>29</b>
2.9 Secagem.....	30
<b>2.9.1 Pré-secagem .....</b>	<b>30</b>
<b>2.9.2 Secagem ao ar livre .....</b>	<b>31</b>
<b>2.9.3 Secagem Solar .....</b>	<b>32</b>
<b>2.9.4 Secagem Convencional .....</b>	<b>32</b>
<b>2.9.5 Secagem em alta temperatura .....</b>	<b>33</b>
<b>2.9.6 Secagem com aumento constante de temperatura .....</b>	<b>33</b>
<b>2.9.7 Secagem a vácuo.....</b>	<b>33</b>
<b>2.9.8 Secagem em baixas temperaturas .....</b>	<b>34</b>
2.10 Tipos de controle .....	35
<b>2.10.1 Controle Manual.....</b>	<b>35</b>
<b>2.10.2 Controle Automatizado .....</b>	<b>35</b>
2.11 Programa de secagem .....	36
2.12 Defeitos de secagem .....	37
2.13 Constituição geral dos secadores .....	38

<b>2.13.1 Materiais da sua estrutura .....</b>	<b>38</b>
<b>2.13.2 Sistemas de aquecimento e energia da estufa .....</b>	<b>39</b>
<b>2.13.3 Trocadores de calor .....</b>	<b>40</b>
<b>2.13.4 Sistemas da circulação do ar .....</b>	<b>41</b>
<b>2.13.5 Ventiladores .....</b>	<b>42</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>43</b>
3.1 Metodologia.....	43
3.2 Secagem ao ar livre.....	44
<b>3.2.1 Dados coletados em campo .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.2 Método de realização de experimento .....</b>	<b>45</b>
3.3 Secadores .....	46
<b>3.3.1 Aprimoramentos .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.2 Dados de Coletados em campo.....</b>	<b>57</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>59</b>
4.1 Secagem ao ar livre.....	59
<b>4.1.1 Influência do clima .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1.2 Experimento .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1.3 Aprimoramento da secagem ao ar livre.....</b>	<b>66</b>
4.2 Aprimoramento no secador.....	66
<b>4.2.1 Propriedades dos elementos estruturais .....</b>	<b>66</b>
<b>4.2.2 Sistema de Ventilação.....</b>	<b>71</b>
4.2.2.1 Dimensionamento .....	72
<b>4.2.3 Propostas de melhorias .....</b>	<b>87</b>
<b>4.2.4 Umidificação .....</b>	<b>89</b>
<b>4.2.5 Sistemas de aquecimento.....</b>	<b>89</b>
4.3 Curvas de secagem .....	90
4.4 Controle .....	94
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>98</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

É inegável o grande uso da madeira desde o princípio das eras, mesmo com a evolução da engenharia dos materiais, e da própria espécie humana, no âmbito da busca de novas matérias-primas para construção, criação, a madeira continuou como grande matéria-prima para a criatividade do ser humano na hábil tarefa da resolução de problemas, sendo ainda, usada, muitas vezes, como uma forma de juntar a arte à praticidade, dando sentido direto a definição da palavra engenhar.

Apesar da versatilidade da madeira, conseguir seu rendimento pleno é um processo árduo e complexo, digno de estudo das mais diversas áreas da engenharia, visto que, seu beneficiamento passa por processos físicos e químicos tendo o encontro de diversas áreas da engenharia em busca dos melhores resultados, mas para que isso aconteça é necessário estudar de maneira aprofundada todos os fatores envolvidos em tais processos, no caso deste trabalho a investigação ocorrerá na área dos secadores e secagem da região da serra catarinense.

A secagem pode ser feita de maneira natural, a qual a madeira é colocada para secar ao ar livre, e por meio de secadores, estes podem ser manuais, semiautomáticos, automáticos, sendo que os primeiros sistemas usando dados controlados começaram a aparecer por meados dos anos 1980, onde ainda se iniciou com o uso da avaliação da temperatura de bulbo úmido e seco da madeira para controlar o ambiente da secagem (SANTINI, 1996).

Para Melo (2005) os secadores são câmaras com equipamentos para controle de umidade e temperatura interna, são consumidores de energia térmica e elétrica, sendo a primeira em forma de vapores obtidos por meio de caldeiras, com um custo baixo, já que a matéria-prima para sua obtenção seriam refugos das madeiras, já a energia elétrica possui um custo mais elevado, esta é utilizada, em sua maioria, para movimentação dos ventiladores e o vapor para o aquecimento do ar através dos trocadores de calor.

Após a conceituação de secadores finalmente se pode conceituar a operação de estudo em questão, a secagem, usando a mesma linha de raciocínio de Melo (2005), como uma operação que possui por base a passagem de linhas de corrente de um fluido secante, geralmente o ar, com capacidade de absorver a umidade, pelo objeto que se deseja secar, ainda, segundo Galvão e Jankowsky (1985) a velocidade da secagem dependerá da velocidade do ar no início, o processo ocorrerá pela circulação forçada do ar, à medida que a umidade reduz, outros fatores acabam influenciando de maior forma, como a densidade, espessura, temperatura, permeabilidade e gradientes de umidade.

Com o objetivo de pesquisar sobre a secagem e secadores no setor madeireiro serrano de Santa Catarina, com a premissa de aprimorar estes, relatando dados sobre eficiência, custo benefícios e possíveis ações para que o processo possa trazer um melhor rendimento, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Análise do processo de secagem;
- Estudo dos secadores;
- Dissertar sobre possíveis mudanças para aprimoramento.

A região serrana catarinense é conhecida pelo seu grande desenvolvimento na indústria florestal, tendo um clima natural propício e um constante aprimoramento genético, conseguindo assim florestas de pinheiros e eucaliptos diferenciadas das demais concorrentes no resto do globo terrestre, possuindo um rendimento de até sete vezes maior que a Escandinávia e três vezes a Península Ibérica (BRANDÃO, 2010).

A sociedade serrana se desenvolveu ao redor do ciclo da madeira, tendo seu apogeu na década de 1950 (MACHADO, 2014). A cidade de maior expressão da serra, Lages, chegou a vivenciar momentos de euforia na economia, graças ao “Ouro Verde”, o município chegou a possuir a maior arrecadação no estado, havendo um grande aumento populacional devido as madeiras, mas a partir do final da década de 1960 a região começou a sofrer com a crise do setor madeireiro e um mau planejamento industrial e empreendedor da sociedade da época, acarretando assim no aumento das zonas periféricas e diversos problemas socioeconômicos (MACHADO, 2014).

Com a proibição do corte de araucárias, a indústria recorreu a novas espécies que se adequassem as condições climáticas da região, começando assim o ciclo madeireiro do *Pinus* (MACHADO, 2014). Por volta dos anos 1990 os reflorestamentos começaram a ganhar força e rentabilidade, dando reinício ao ciclo da madeira, com um impacto menor sobre a sociedade serrana (MACHADO, 2014).

Atualmente a economia ainda tem forte influência do setor madeireiro, não tendo início de nenhum novo ciclo econômico, podendo assim afirmar que Lages e região ainda está vivenciando o ciclo madeireiro com reaquecimento econômico do setor, tendo grandes investimentos em reflorestamentos (MACHADO, 2014).

Galvão e Jankowsky (1985) ressaltam que alguns benefícios da secagem com uso dos secadores são: diminuir a umidade da madeira, e conseqüentemente o seu peso total; destruir e diminuir o risco de ataques de fungos; melhorias nas propriedades mecânicas; maior precisão

nos produtos derivados da madeira; melhorias nas aplicações de vernizes, tintas e a juntas de colagem; melhorias na funcionalidade dos líquidos para preservação da madeira; maior efetividade como isolante térmico e elétrico.

Uma secagem malfeita, seja ela ao ar livre ou por uso de secadores, pode ocasionar alguns danos irreversíveis para a madeira, segundo Galina e Jankowsky (2013) os defeitos mais comuns são: empenamento, colapsos, rachaduras e encruamentos.

Além dos já citados, um secador mal regulado pode ocasionar a necessidade de efetuar retrabalho, maior tempo de secagem, mais gastos no processo de secagem, devido à perda de eficiência e, conseqüentemente, um aumento de gastos culminando na diminuição de rentabilidade do processo (MELO, 2005).

É necessário ressaltar a complexidade do estudo da madeira em si, devido ser um material orgânico higroscópico e anisotrópico, com variações em suas dimensões de acordo com o seu teor de umidade (GALINA e JANKOWSKY, 2013). Existe também uma vasta gama de variáveis no processo que devem ser estudadas e controladas para diminuir o risco do aparecimento de defeitos ao mínimo possível, de forma rentável que ainda consiga oferecer a madeira a um preço competitivo em relação aos concorrentes de mercado.

Fora tudo o que foi discorrido, o estudo dos secadores de madeira serrada para área de engenharia mecânica é uma oportunidade de aprimorar os conhecimentos sobre máquinas de trocas térmicas e todos seus conceitos em si, como fluidos de aquecimento, trocadores de calor, perdas de energia devido a fatores internos e externos, dinâmica e escoamento dos gases, isolamento térmica, e todos os fatores que envolvem o rendimento a operação em si, como métodos de aumento e condução de fluxo de ar e sua velocidade, entre outros.

Ainda, o aprimoramento destes, pode contribuir para uma melhora em um setor de grande importância e impacto em toda sociedade serrana, que se desenvolveu entorno do mesmo, além do conhecimento sobre a tecnologia envolvida nos processos de secagem na indústria madeireira da região da serra de Santa Catarina

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 A água na madeira

Para a secagem, a água na madeira pode ser dividida em: higroscópica, capilar e de adsorção química (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

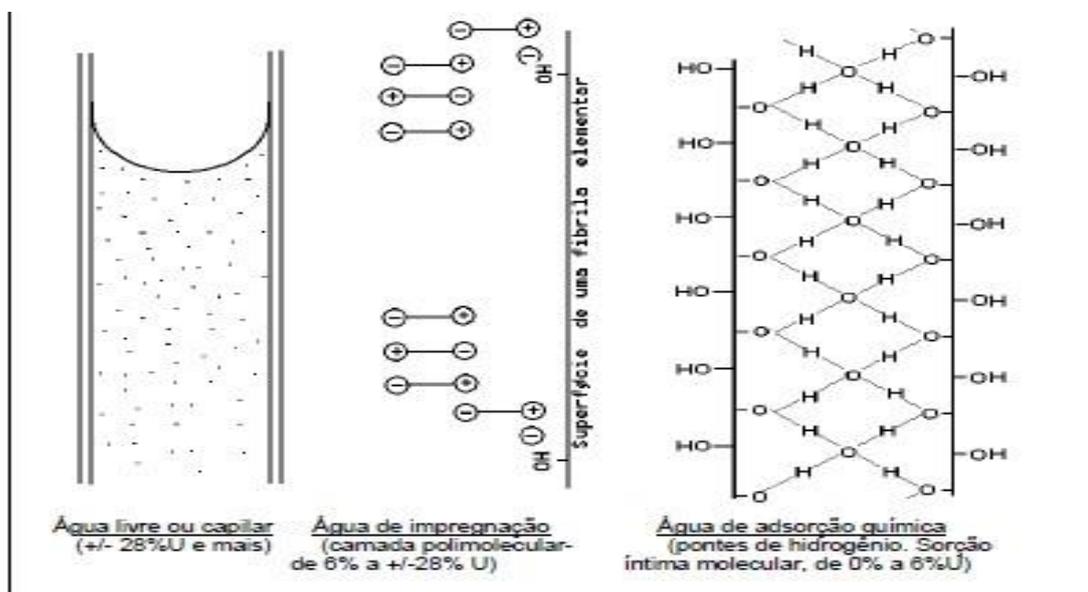
De maneira sucinta, a água de capilaridade ou água livre, pode ser definida como: “[...] aquela localizada nos lúmens celulares e espaços intercelulares, retida por forças capilares” (SANTINI; p.4, 1996).

A água de adesão refere-se à porção higroscópica contida no interior das paredes celulares da madeira, após ter sido realizada a remoção da água livre (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

A água de adsorção química refere-se à porção compreendida entre os teores de 0% e 6% de umidade, adquirida por forças de Van der Waals e pontes de hidrogênio (MORESCHI, 2012).

A quantidade de água higroscópica está relacionada principalmente às propriedades mecânicas da madeira, como massa específica, contrações e inchamentos, já água de capilaridade possui maior influência na parte térmica e resistência elétrica da madeira (SANTINI, 1996).

Figura 1 Representação dos tipos de águas na madeira



Fonte: Moreschi (2012).

## 2.2 Ponto de saturação de fibras

Segundo Galina e Jankowsky (2013) no processo de secagem após a eliminação da água capilar é chegado ao estado conhecido como ponto de saturação de fibras (PSF), neste momento a madeira possui valores de umidade entre 25% a 32% de umidade, contendo o máximo de água higroscópica, para efeito de estudo e praticidade para eventuais cálculos o valor do PSF é fixado em 28% (MORESCHI, 2012). Kiene (1997) em seu trabalho nos fala que é a partir do PSF que a madeira possui suas mudanças abruptas em suas características mecânicas.

## 2.3 Adsorção

A adsorção é a capacidade de aquisição de fluidos por um material poroso, geralmente, a obtenção fluídica por adsorção está relacionada apenas a uma camada monomolecular, mas se o material for polimolecular pode ser atingido o valor de até dez camadas, salvo para raras exceções (MORESCHI, 2014). Na madeira a adsorção seria a adesão da água de forma espontânea (MORESCHI, 2012).

O fenômeno oposto da adsorção é conhecido como dessorção, que seria a perda espontânea de fluidos pela madeira, geralmente por evaporação (MORESCHI, 2012).

Moreschi (2014) fala sobre cinco tipos de adsorção, sendo estas, segundo o mesmo:

Adsorção tipo 1: também conhecida como adsorção de Langmuir, compreende a adsorção monomolecular (uma só camada de moléculas), e adsorção química.

Adsorção tipo 2: pode ser chamada de adsorção Sigmoide, sempre molecular, tem seu início parecido com a de Langmuir, com formação na camada molecular, ocorre principalmente na adsorção de vapor, em celulose e madeira, a adsorção é baixa quando comparada com as que envolvem as paredes celulares.

Adsorção tipo 3: tem como diferença do tipo 2 as forças de atração do adsorvente e adsorvido, sendo estas praticamente iguais, por isso a adsorção deste tipo geralmente é pequena.

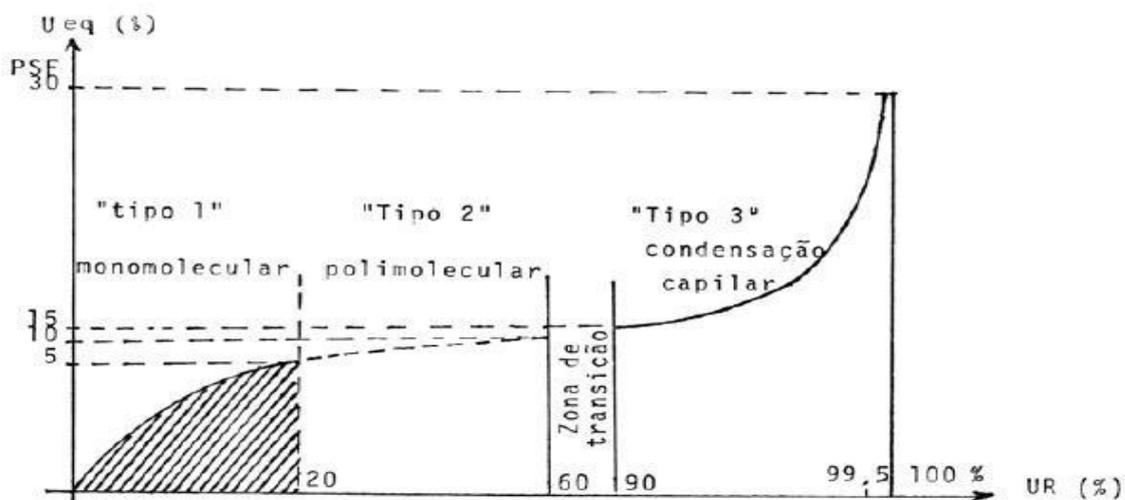
Adsorção tipo 4: é uma variação do tipo 2, tem seu final limitado, atua em materiais rígidos com capilares muito finos, como exemplo, seria a adsorção de vapor em sílica-gel.

Adsorção tipo 5: é um caso de variação do tipo 3, limitada pela mesma forma do tipo 2, tem como exemplo a adsorção do carvão.

A primeira água adquirida na madeira é a água de adsorção química, a qual pertence a adsorção de tipo 1, ocorre na faixa dos 20% de umidade relativa, a água adsorvida para as

regiões polimolecular ocorre entre 20% e 90%, onde a partir de 60%-65% começa a transição do tipo 2 para o tipo três atingindo temperaturas perto da condensação (MORESCHI, 2014).

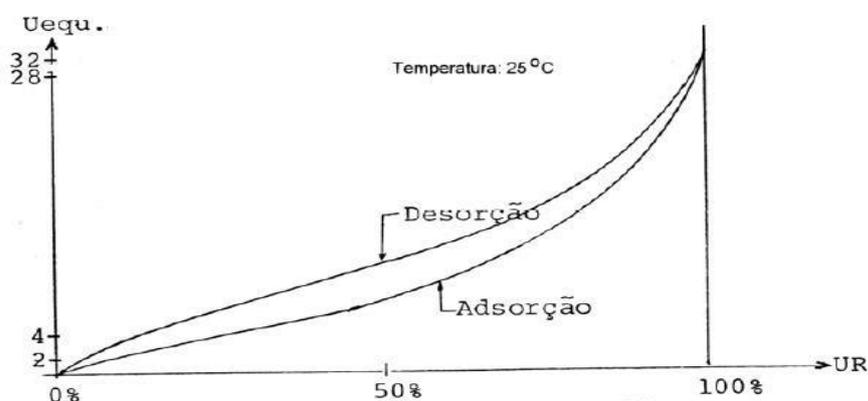
Figura 2 Representação das fases da adsorção na madeira



Fonte: MORESCHI (2014).

A sorção possui níveis diferentes para a adsorção e dessorção, acontecendo o que é chamado como histerese da sorção podendo ser definida como: a diferença entre as curvas das isotermas da adsorção e dessorção, em que a dessorção possui uma umidade de equilíbrio maior do que a adsorção (MORESCHI, 2012).

Figura 3 Histerese da sorção



Fonte: MORESCHI (2012)

## 2.4 Movimentação da água

A água se movimenta das regiões de alto teor de umidade para as de baixo teor, pelas aberturas naturais e paredes celulares da madeira, para que a movimentação da água ocorra é necessário o fornecimento de energia à madeira, para o estudo e conhecimento desta ação da água é necessário subdividir o movimento de duas maneiras: o por fenômenos de capilaridade, o qual é acima do ponto de saturação de fibras, e por difusão, que ocorre abaixo do PSF (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

Os fenômenos de capilaridade ocorrem devido a diferenças de pressões e efeitos da tensão superficial (FOUST *et al*, 2015). Kiene (1997) define tensão superficial como um comportamento entre líquido e um gás, podendo ser expressa como uma força sobre determinada área ou energia por unidade de área.

Galvão e Jankowsky (1985) *apud* Skaar (1964) relata que o maior problema na operação de secagem é a remoção capilar, devido a necessidade do uso de baixas temperaturas retardando o processo de secagem.

Após a eliminação do conteúdo da água capilar, quando se atinge o ponto de saturação de fibras, pode, então, iniciar a movimentação por difusão (SANTOS, 2002).

Pelo fenômeno de difusão é eliminada a água higroscópica e a de vapor d'água, sendo a primeira com maior influência na secagem, essa se movimenta por gradientes de umidade que se estabelece nas paredes celulares, sua representação matemática é complexa devido as variáveis de fluxo de umidade e gradiente serem variáveis no espaço tempo (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

## 2.5 Umidade

A umidade influencia diretamente na massa específica, nas dimensões, qualidades de suas propriedades, ataque de fungos, defeitos como empenamentos, torções, arqueamentos entre outros (MORESCHI, 2012).

De forma generalizada, a árvore recém abatida está saturada de fluidos, devido a seiva bruta e elaborada, contida na mesma, tendo seus vasos, canais, lúmens e espaços vazios, com uma grande quantidade de líquidos, possuindo assim um alto teor de umidade. (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

O teor de umidade pode ser facilmente calculado pela relação da massa da água e a massa da madeira seca em uma estufa de 103 °C até atingir um valor constante (MARTINS, 1988).

Equação 1 Teor de umidade

$$u = \frac{Pa}{Ps}$$

Ou ainda:

Equação 2 Fórmula para teor de umidade quando não se sabe o peso da água na madeira.

$$u = \frac{Pu - Ps}{Ps}$$

$u$  - umidade da madeira;

$Pa$  - peso da água na madeira;

$Pu$  - peso da madeira úmida;

$Ps$  - peso da madeira seca;

$U$  - umidade da madeira em percentagem.

A umidade também pode ser calculada de maneira indireta com dados obtidos por medidores elétricos ou amostragem da madeira (GALVÃO E JANKOWSKY, 1985):

Equação 3 Para peso seco da madeira.

$$P_{se} = \frac{100 \cdot P_i}{U_i + 100}$$

$P_{se}$  = peso seco da peça estimado;

$P_i$  = peso inicial da peça;

$U_i$  = média das umidades das amostras.

Tabela 1 Teor de umidade recomendado para madeira em algumas aplicações.

<b>PRODUTOS</b>	<b>%</b>
Madeira Serrada Comercial	16-20
Madeira para Construção Externa	12-18
Madeira para Construção Interna	08-11
Painéis (compensado, aglomerado, laminados, etc.)	06-08
Pisos e Lambris	06-11
Móveis para Interiores	06-10
Móveis para Exteriores	12-16
Equipamentos Esportivos	08-12
Brinquedos para Interiores	06-10
Brinquedos para Exteriores	10-15
Equipamentos Elétricos	05-08
Embalagens (caixas)	12-16
Formas para calçados	06-09
Coronhas de Espingarda	07-12
Instrumentos Musicais	05-08
Implementos Agrícolas	12-18
Barcos	12-16
Aviões	06-10

Fonte: JANKOWSKY (1990).

Além das fórmulas citadas anteriormente, a umidade máxima pode ser calculada pela seguinte fórmula, segundo (MORESCHI, 2012).

Equação 4 Para o teor máximo de umidade.

$$U_{max} = 0,28 + \left[ \frac{1,50 - ro}{1,50 \cdot ro} \right] \cdot 100$$

$U_{max}$  - teor de umidade máximo;

0,28 -valor médio do PSF;

1,50-valor médio aproximado à massa específica da matéria lenhosa que constitui a madeira (massa específica real);

*ro*-massa específica aparente da madeira, a 0%U.

## 2.6 Métodos de medição de umidade

### 2.6.1 Método pela secagem em estufa

A base deste método de medição é constituída pela secagem e pesagem de algumas amostras entre as temperaturas de 101°C e 105°C em uma estufa com circulação de ar forçada. As amostras são pesadas periodicamente até chegar no ponto de constância nas pesagens do peso das amostras, estas são resfriadas em temperatura ambiente, em um dessecador contendo algum tipo de produto que as mantenham secas, conseguindo assim estimar o peso seco da madeira, para determinar a umidade é usada as fórmulas que relacionam o peso úmido e seco da mesma, as amostras devem estar a mais de trinta centímetros das extremidades das tábuas que foram retiradas para dados mais precisos, uma vez que as extremidades tendem a possuir um menor teor de umidade (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

### 2.6.2 Método da destilação

É o método recomendado para madeiras ricas em óleos e em resinas, é colocado dez gramas da madeira em um recipiente com algum tipo de solvente com densidade menor e temperatura de ebulição maior do que a água, ambos são aquecidos até evaporarem e então entram em contato com algum tipo de refrigerante que os fazem a se condensarem, ambos são separados por gravidade, para aplicar este método existe uma série de complicações como: a necessidade de laboratório e equipe técnica, uso de elementos inflamáveis, vidrarias frágeis e de alto custo (MORESCHI, 2012).

### 2.6.3 Método da titulação

Possui uma grande precisão, é usado o reagente Karl Fischer para titulação, é usado meio gramas de madeira umedecidas com metanol por seis horas, o reagente é adicionado até a solução se tornar incolor, o volume gasto de reagente será o teor de umidade (MORESCHI, 2012).

#### 2.6.4 Método por medidores elétricos

Método qual pode ser realizado por duas formas:

Pela resistência: é baseado na resistência da madeira a corrente elétrica contínua, esta é determinada por aparelhos portáteis com precisão de aproximadamente de 1,5% de umidade, conseguem medir entre as escalas de 6% a 25% de umidade, ainda possuem eletrodos para diversas espessuras além de escalas que convertem a resistência diretamente em percentuais (MORESCHI, 2012).

Pela capacidade elétrica: “Estes aparelhos baseiam-se na medição da capacidade elétrica da madeira, ou da constante dielétrica ( $\epsilon$ ). Eles têm, afora o princípio de funcionamento, as mesmas características dos aparelhos anteriormente descritos” (MORESCHI, p.36, 2012).

De acordo com Galvão e Jankowsky (1985) a faixa de variação dos medidores elétricos é justamente a principal para trabalhar com a madeira, as medições devem ser realizadas com trinta centímetros de distância das extremidades devido a gradientes de umidade nas peças, eles ainda citam que Stamm (1960) salienta a necessidade de as agulhas serem cravadas paralelamente as fibras, pois existem espécies de madeiras com resistividade de até três vezes maior do que direção normal das fibras.

#### 2.6.5 Método higrométrico

“Consiste em introduzir um higrômetro em um orifício aberto na madeira, o qual é em seguida selado, ocorrerá o equilíbrio entre a umidade da madeira e a do ar contido no orifício, que será correspondente à umidade de equilíbrio da madeira” (GALVÃO e JANKOWSKY, p.22, 1985).

#### 2.6.6 Método por radiação nuclear

Constitui no uso de um gerador de nêutrons em velocidade, o qual é dirigido para madeira onde parte dos mesmos tem sua velocidade diminuída pelas moléculas de hidrogênio contidas na água (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

A densidade da madeira deve ser obtida, para isso é usada radiação gama em direção a madeira, a intensidade refletida no material desta é inversamente proporcional a densidade da madeira, a junção dos dados coletados com os nêutrons e radiação gama fornecem o teor de

umidade, este método é recomendado para processos contínuos, onde a umidade é determinada continuamente, como na indústria de papel e celulose (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

## 2.7 Umidade de equilíbrio

É denominada como o teor de umidade dinâmica da madeira com o ambiente, pois essa sofre variações e influência do meio externo como temperatura e umidade relativa do ambiente (GALINA e JANKOWSKY, 2013).

A umidade de equilíbrio segundo Simpson (1971) pode ser calculada pela seguinte fórmula:

Equação 5 Umidade de equilíbrio.

$$UE = \left[ \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot h}{1 + K_1 \cdot K_2 \cdot h} + \frac{K_2 \cdot h}{1 - K_2 \cdot h} \right] \cdot \frac{1800}{W}$$

$UE$  = umidade de equilíbrio da madeira (%);

$K_1 = 3,730 + 0,03642T - 0,000154T^2$ ;

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

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

$T$  = temperatura na escala Farenheit;

$h$  = pressão relativa de vapor d'água  $\rightarrow \frac{\text{umidade relativa}\%}{100}$

Antes de mais nada, por sofrer influências diretas da umidade relativa e temperatura é necessária uma abordagem sobre estes.

Segundo Kiene (1997) a umidade relativa do ar (UR) pode ser definida como a relação entre as pressões parcial e a saturada do vapor, podendo ser expressa pela seguinte fórmula:

Equação 6 Umidade relativa em porcentagem.

$$UR = \frac{p}{p_0} \cdot 100$$

$UR$  = umidade relativa em percentual;

$p_0$  = pressão saturada;

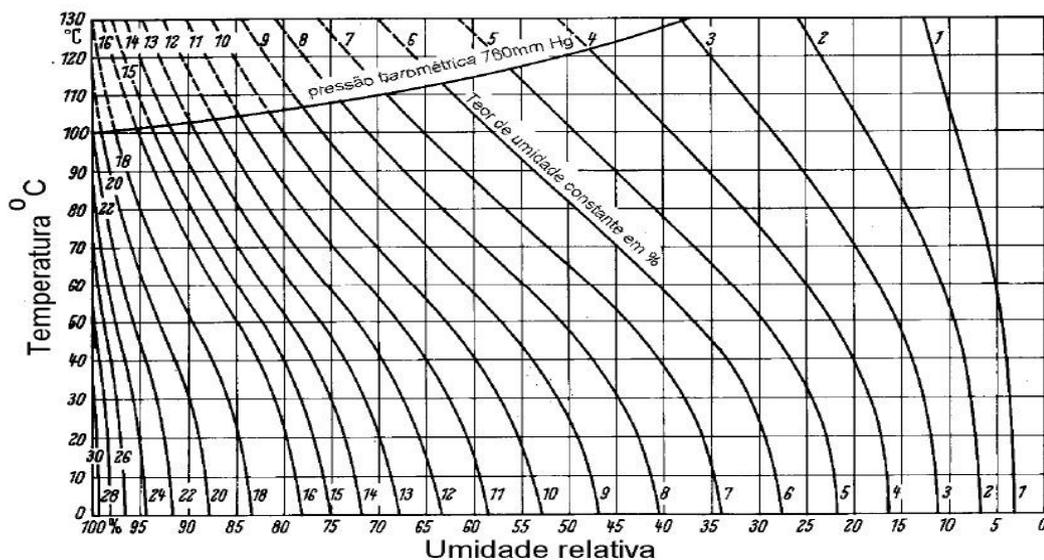
$p$  = pressão parcial.

A UR pode ser medida por psicrômetros, que em sua essência são dois termômetros para medir as temperaturas de bulbo seco e úmido, o medidor do bulbo seco é colocado um tecido umedecido, ou de alguma maneira ser continuamente umedecido, a vaporização deste estabiliza a temperatura dando então o valor do bulbo úmido, já o do bulbo seco, fica em equilíbrio térmico com o ar, ambos na secagem devem ser colocados em locais onde exista fluxo constante de ar impulsionado pelos ventiladores, com o uso de equações, tabelas ou gráficos então é possível conseguir o valor da umidade relativa, em controladores, a umidade a UR é continuamente medida (KIENE, 1997).

A umidade relativa está ligada diretamente a capacidade do ar em absorver umidade, quanto menor a umidade relativa, maior será a capacidade do ar em absorver umidade, com o passar do tempo, a superfície da madeira vai se tornando mais seca e as forças de retirada por vapor da umidade vão diminuindo, para resolver tal problema, existem duas possibilidades, as quais são o aumento da temperatura de bulbo seco, ou a diminuição da umidade (SANTINI, 1996).

Segundo Galvão e Jankowsky (1985) a temperatura influencia nos índices da umidade de equilíbrio de maneira imediata, contudo é um efeito temporário e reversível, para mudanças permanentes na umidade de equilíbrio (UE) é necessário o uso de altas temperaturas. Os mesmos autores ressaltam que a madeira secada por ar livre possuem índices de UE maiores do que as secadas em secadores, já que a UE diminui de acordo com o aumento da temperatura.

Figura 4 Gráfico da relação temperatura-umidade de equilíbrio e umidade relativa.



Fonte: MORESCHI (2012).

## 2.8 Propriedades térmicas da madeira

### 2.8.1 Calor Específico

Santini (1996) *apud* Stamm (1964) que a relação do calor específico pode ser calculada acima de 0 °C, pela seguinte fórmula:

Equação 7 Calor específico da madeira de 0°C.

$$c = 0,266 + 0,00116t$$

Onde “[...] o valor 0,266 corresponde ao calor específico da madeira acima de 0°C” (SANTINI, p.13, 1996). Já o calor específico pode ser calculado pela seguinte fórmula (SANTINI, 1996):

Equação 8 Calor específico.

$$c = \frac{Q}{m \cdot (T_2 - T_1)}$$

$c$  = calor específico;

$m$  = massa do material;

$T_1, T_2$  = temperatura.

## 2.8.2 Condutividade Térmica

“[...] essa propriedade, que é classificada como uma propriedade de transporte, fornece uma indicação da taxa na qual a energia é transferida pelo processo de difusão[...]” (INCROPERA *Et.al*, p.39, 2008). E segundo o mesmo autor pode ser calculada pela seguinte fórmula:

Equação 9 Condutividade térmica no plano x.

$$K_x = \frac{q_x''}{\frac{\partial T}{\partial X}}$$

Santini (1996) *apud* Siau (1984) fala que a condutividade térmica da madeira em níveis de umidade de 12% é de 3 e 7,5 ( $10^{-4}$ ) cal/cm $\cdot$ °C $\cdot$ s, mostrando que a madeira possui bom isolamento térmico.

Kiene (1997) relata sobre outra fórmula, mais simples para o cálculo da condutividade térmica, sendo esta:

Equação 10 Condutividade térmica.

$$K = \frac{Q'' \cdot L}{t \cdot A \cdot \Delta T}$$

$K$ -condutividade térmica, J/(m.K.s) ou W/m.K;

$Q''$  -quantidade de calor transferido, J;

$t$ -intervalo de tempo, s;

$A$ -área da seção transversal perpendicular a direção do escoamento,

$L$ -distância do caminho do fluxo do calor no material, m.

$\Delta T$ -diferença de temperatura entre as faces, K.

Kiene (1997) relata os estudos de McLean (1941) que resultaram nas seguintes equações empíricas:

Para umidade menor que 40%:

Equação 11 Equação empírica de McLean da condutividade térmica para umidade menor de 40%

$$K_{gT} = [G(4,80 + 0,090M) + 0,57]. 4,186. 10^{-2}.$$

$K_{gT}$  = condutividade térmica transversal da madeira;

$M$  = teor de umidade inferior 40%;

$G$  = massa específica básica da madeira.

Para teores acima de 40%:

Equação 12 Equação empírica de McLean para umidade acima de 40%.

$$K_{gT} = [G(4,80 + 0,125M) + 0,57]. 4,186. 10^{-2}.$$

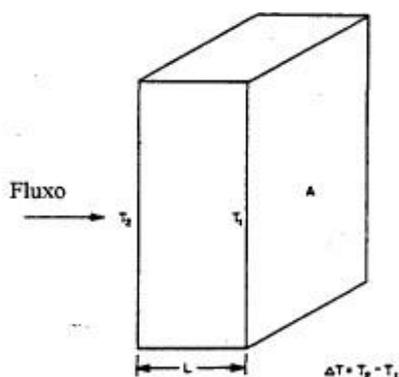
Kiene (1997) ainda cita que McLean (1952) com seus estudos conseguiu a seguinte relação sobre a condutividade térmica longitudinal e transversal conseguindo então escrever a seguinte equação:

Equação 13 Condutividade térmica longitudinal

$$K_{gL} = 2,5. K_{gt}$$

$K_{gL}$  -condutividade térmica longitudinal na madeira.

Figura 5 Sentido do fluxo de calor em determinado objeto.



Fonte: Kiene (1997) *apud* Siau (1984).

### 2.8.3 Difusividade térmica

Segundo INCROPERA *Et al.* (2008) a difusividade térmica é a relação da condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica, sendo representada pela seguinte equação:

Equação 14 Difusividade térmica.

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot c_p}$$

$\alpha$  -difusividade térmica;

$K$  -condutividade térmica;

$\rho$  -densidade da madeira;

$c_p$  -calor específico.

(SANTINI, p.15, 1996 *apud* WAANGARD,1969) “a difusividade térmica determina a taxa da temperatura em um material, quando este é submetido a uma mudança na temperatura ambiente”.

### 2.8.4 Expansão térmica

O aumento de energia interna gera vibrações nas moléculas da madeira, fazendo ocorrer mudanças em suas dimensões (SANTINI, 1996).

A alteração da dimensão é proporcional a mudança de temperatura e dimensão inicial podendo ser expressa pela seguinte fórmula:

Equação 15 Variação de comprimento.

$$\Delta L = \alpha \cdot L_1 \cdot \Delta T$$

$\Delta L$  =variação de comprimento;

$L_1$  =comprimento inicial;

$\alpha$  =coeficiente de expansão térmica;

$\Delta T$  =variação de temperatura.

## 2.9 Secagem

Os processos básicos da secagem estão embasados fundamentalmente no deslocamento da corrente de ar pela superfície da madeira, tendo o calor do ar transferido para a mesma, ocorrendo a vaporização e posteriormente, o mesmo liquido, agora em forma de vapor, é absorvido pelo ar, com o aumento da temperatura ocorrerá um gradiente de umidade acarretando na movimentação da água do seu interior para o superior (JANKOWSKY, 1995). O mesmo autor descreve que a movimentação na fase líquida depende da estrutura anatômica da madeira e das outras fases é um fenômeno difusivo, que depende da termodinâmica na corrente do ar e das características da madeira.

### 2.9.1 Pré-secagem

“[...]Pode ser definida como um processo que é executado normalmente em galpões cobertos ou câmaras, onde a circulação do ar ocorre em função da utilização de ventiladores” (KIENE, p.99, 1997).

Segundo Kiene (1997) estrutura dos pré-secadores não possuem isolamento térmica as temperaturas são baixas e a umidade varia de 50 a 80% e a velocidade do ar entre 0,4 m/s e 0,8 m/s.

### 2.9.2 Secagem ao ar livre

Segundo Martins (1988) é o método que consiste no empilhamento da madeira de forma conveniente, medindo entre intervalos a umidade da madeira até esta atingir o valor desejado.

O empilhamento padrão é colocada de formas sobrepostas entre sarrafos, conhecidos como separadores, para passagem do ar, quanto mais úmido for o lugar, maior deve ser a espessura do separador, atingindo valores de até uma vez e meia da espessura das tábuas, em lugares secos ocorre o processo contrário, a altura padrão é de cerca de seis metros e com uma média de dois metros de largura (MARTINS, 1988).

As pilhas devem ter sua base com cerca de trinta centímetros de distância do solo, pátio plano, sem vegetação e poças d'água, além do clima da região, são fatores determinantes para a secagem ao ar livre (JANKOWSKY, 1990).

Tabela 2 Teor de umidade recomendado para madeira em algumas aplicações.

<b>Espessura das tabuas em mm</b>	<b>Espessura dos separadores em mm</b>	<b>Espaçamento em mm</b>	<b>Largura dos separadores em mm</b>
<b>0-30</b>	16	400-800	25
<b>30-60</b>	25	600-1000	25
<b>Acima de 60</b>	40	800-1200	40

Fonte: adaptado, Martins, (1988)

Kiene (1997) cita algumas vantagens e desvantagens deste processo. Tendo como algumas vantagens a grande uniformidade da umidade no interior da peça e poucas tensões e defeitos de secagem no fim do processo.

E como desvantagens, longo período no tempo de secagem, muitas variáveis envolvendo o ambiente que não podem ser controladas, geração de grandes estoques e conseqüentemente, necessidade de grandes pátios para a secagem.

Ciniglio (1998) cita que a secagem ao ar livre pode ser usada como uma pré-secagem, até chegar no PSF, quando então pode ser usado métodos de secagem de condicionamentos mais rigorosos a madeira.

### 2.9.3 Secagem Solar

Segundo Kiene (1997) esse segmento de forma de secagem é pouco usado na prática, tendo sua maioria de projetos para parte de testes e estudos sem valores para aplicação comercial.

Funciona embasada nos princípios do uso da energia solar, usando defletores e refletores, para o uso do calor dentro da estufa, uma com cobertura transparente capta a energia solar absorvida por uma superfície pintada de preto, aumentando o potencial de temperatura da estufa, podendo ter um acréscimo de até 20 °C da temperatura ambiente, a secagem em si não possui métodos para controle por ser uma espécie de secagem ao ar livre, mas com uma eficiência maior devido ao advento da potencialização da energia solar (MARTINS, 1988); (SANTINI, 1981).

### 2.9.4 Secagem Convencional

Segundo Almeida (2011) este é o método com maior flexibilidade para o controle das variáveis na secagem. Jankowsky (1995) em seus estudos relata que estes secadores são normalmente compostos por um sistema de aquecimento, sistema de umidificação do ar, conjunto de *dampers* ou janelas, e um sistema de ventilação para circulação do ar. “[...]Esse método é caracterizado por operar com temperaturas entre 40 °C e 90 °C, ter circulação forçada de ar para umidificação do ar.” (JANKOWSKY *Et al*, p.3, 2000). Kiene (1997) destaca que o fluido térmico mais usado é o vapor d’água na faixa de 300-800 kPa.

Segundo Santini (1996) o funcionamento ocorre da seguinte forma: os ventiladores impulsionam o ar que passa por trocadores de calor, geralmente por radiadores ou serpentinas, posteriormente atingem a pilha de madeira transversalmente, o número de ventiladores devem distribuir de forma uniforme o ar na estufa em velocidades entre 2m/s e 3m/s, a umidade relativa é controlada por sistemas de vaporizadoras de água e por sistemas de renovação de ar, Melo (2005) salienta que nem todos secadores são iguais, podendo ter mudanças dependendo do que de fato é requerido no processo.

Jankowsky (2000) ressalta alguns pontos de relevância nos secadores convencionais, sendo estes:

O uso de um bom isolante térmico acarretará em menores perdas de calor por radiação e consumo de vapor.

A circulação de ar deve ser uniforme e intensa na parte superior;

Os trocadores de calor devem ser dimensionados de acordo com a capacidade e rendimento que se deseja na secagem, um equipamento mal dimensionado acarreta na demora para elevação da temperatura e mantê-la constante;

Bom dimensionamento das janelas e ventiladores ajudam a não ter uma troca térmica deficiente.

Ainda, altas temperaturas na secagem podem ocasionar rachaduras e trincas, entretanto após a remoção do teor de umidade da capilaridade, aproximadamente o teor de 28% do PSF a temperatura pode ser maior (JANKOWSKY 1995).

Kiene (1997) *apud* Rice (1994) relatou em suas pesquisas que aproximadamente 82% dos EUA usam esse tipo de secagem gerando 4 milhões de madeira seca anualmente.

#### 2.9.5 Secagem em alta temperatura

Consiste no uso de temperaturas acima da secagem convencional na faixa de 100-150°C, estruturalmente é semelhante com os secadores convencionais, as maiores diferenças estão na potência térmica, circulação do ar e capacidade de renovação de matéria, o maior problema deste método são os defeitos que podem aparecer na madeira, para amenizar os problemas, as estufas mais modernas utilizam rigorosos planos de controle dos parâmetros no processo (KIENE, 1997).

#### 2.9.6 Secagem com aumento constante de temperatura

É usada com coníferas, caracterizada pelo controle da transferência de calor tendo um aumento constante da temperatura de bulbo seco, resultando uma taxa constante de secagem, inicia-se na temperatura de 60°C proporcionando a remoção da umidade sem grandes degradações térmicas, a secagem acaba por volta da temperatura 100°C (KIENE, 1997).

#### 2.9.7 Secagem a vácuo

Apesar da secagem a vácuo ser conhecida desde da década de 1920, começou efetivamente a ser estudada e usada a partir da década de 1960, por ser considerada como inviável economicamente, mas por volta de 1970 pelo advento do aumento dos custos dos grandes estoques da madeira, e para a secagem segura de madeiras espessas de autovalor. (JANKOWSKY, 1995; SANTINI, 1996).

A parte física da estufa “constituem-se de cilindros de pressão ou autoclave, com capacidade média para 15 m<sup>3</sup> de madeira, confeccionados de aço especial e isolados externamente com fibra de vidro envolvida em lâminas de alumínio” (SANTINI, p.36, 1996). Ainda é necessário, como complemento, bombas de vácuo, e condensador para retirada da água.

Jankowsky (1995) relata que a principal diferença entre os secadores a vácuo são as fontes de calor, as quais serão descritas abaixo, segundo o mesmo autor em questão:

Aquecimento descontínuo de vapor: tem como maior inconveniente a não possibilidade de controle da temperatura, podendo atingir valores relativamente altos.

Aquecimento por radiação com uso de trocadores de calor: ocorre o processo de convecção forçada o processo é controlado, mas com o problema de baixa eficiência térmica;

Troca térmica por pratos aquecidos: estes ficam em contato com a madeira, existe controle razoável, porém a capacidade da estufa é diminuída, e as pilhas de madeira entre as placas;

Aquecimento por radiofrequência: é gerado um campo eletromagnético o qual ocasiona o aquecimento da madeira, tem como única desvantagem o seu consumo elétrico, é o mais aconselhado a ser usado quando em comparação com os outros processos.

#### 2.9.8 Secagem em baixas temperaturas

Também são conhecidos como desumidificadores, são constituídos basicamente de um compressor, de válvula de descompressão, dois trocadores de calor, dutos e ventiladores, as variáveis de controle do processo, basicamente, são a temperatura e a umidade relativa, sua temperatura máxima é de 80°C, mas na maioria dos equipamentos atinge valores entorno de 50°C (JANKOWSKY, 1995; KIENE, 1997).

A secagem no secador funciona da seguinte forma: o ar que circula dentro da câmara passa por serpentinas frias, perdendo um grande valor de umidade, pelo processo de condensação, a água formada é drenada para o exterior, o ar então passa por trocadores de calor para seu aquecimento e posteriormente impulsionados para o interior da câmara por ventiladores, após passar pelas pilhas de madeira e adquirir a umidade o ar passa por um sistema de desumidificação reiniciando o processo (KIENE, 1997; SANTINI, 1996).

## 2.10 Tipos de controle

### 2.10.1 Controle Manual

“O controle manual da secagem geralmente é empregado em operações muito pequenas, que usam, muitas vezes, equipamentos projetados em casa, para operações em que uma pessoa monitora a estufa quase em tempo integral” (SANTINI, p.66. 1996).

Para que de fato ocorra o controle, as temperaturas de bulbo úmido e seco devem ser conhecidas, para que se possa regular o aquecimento e a umidade relativa do ar, através de válvulas, podendo, então, atingir o valor desejado de tais variáveis, a ventilação também deve ser controlada, para manter a uniformidade no processo é requerido a presença constante do operador da estufa, para realizar as devidas regulagens das válvulas e ventiladores (ALMEIDA, 2011; SANTINI, 1996).

### 2.10.2 Controle Automatizado

Os controles que usam a automação do processo podem ser divididos em dois, sendo os semiautomáticos, que necessitam de um operador para ajustes das variáveis do processo, e os automáticos, o quais o próprio sistema se autocorrigem (ALMEIDA, 2011).

O uso do controle segundo Wengert e Evans (1971) podem ser usados para o controle das janelas de ventilação, temperaturas do bulbo úmido e seco além do calor dentro da estufa.

Santini (1996) relata que a automatização pode ser feita de maneira contínua ou de forma periódica, por maneira contínua o controle se torna mais fácil do que a análise periódica, geralmente, pelo primeiro método citado, é usada a relação temperatura-tempo de secagem, onde as condições internas da estufa são baseadas no tempo decorrido do processo.

Segundo Simpson (1991) as estufas com controle automático possuem as seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens:

- Os dados iniciais da secagem são pré-determinados e o monitoramento é mínimo;
- A secagem pode ser realizada de maneira contínua com mudanças suas em suas variáveis, e não por etapas, ocasionando assim, em uma maior economia de gastos em energia;
- A madeira pode ser cortada com uma determinada espessura de acordo com a espécie, podendo dar uniformidade no processo.

Desvantagens:

- Pode ocorrer erro na aferição de dados ocasionando uma secagem defasada, com o secador desligando ou secando de maneira errônea trazendo defeitos no produto;
- Cuidados e experiência são necessárias para uso preciso da estufa.

## 2.11 Programa de secagem

Segundo Galvão e Jankowsky (1985) é como de fato irá ocorrer a secagem, da melhor maneira possível, de acordo com estudos e conhecimentos empíricos sobre o processo em si, estes geralmente são baseados em umidade-temperatura, tempo-temperatura ou gradiente de secagem, nesta ainda existe três fases de grande importância (aquecimento inicial, secagem propriamente dita, uniformização e condicionamento) as quais serão relatadas abaixo de acordo com o mesmo autor:

**Aquecimento inicial:** é a fase a qual a madeira é preparada para a secagem, a umidade relativa do ar fica em níveis de 85%, é recomendado que a madeira fique uma hora por centímetro de espessura, a diferença entre a temperatura de bulbo seco e úmido não pode ser maior do que 2 °C.

**Secagem propriamente dita:** deve-se usar temperaturas baixas no início da secagem para evitar defeitos, em torno de 40 °C a 60 °C, após a remoção da água de capilaridade a temperatura pode ser elevada, a umidade relativa deve ser maior à medida que a velocidade do ar seja aumentada.

**Uniformização e condicionamento:** dependendo do material este processo pode não ser necessário, a uniformização corresponde a padronização do teor de umidade da madeira, e o condicionamento é feito para o alívio das tensões internas, diminuindo o gradiente de umidade e aumentando a umidade relativa do ar.

Já sobre os processos em si, o de umidade- temperatura é o mais comumente usados no mundo industrial, entretanto cada caso deve ser estudado para o uso do melhor programa de secagem, analisando suas possibilidades de controle do processo (GALINA e JANKOWSKY, 2013).

## 2.12 Defeitos de secagem

A maioria dos defeitos na secagem são correlacionados as tensões que a madeira sofre no processo, os defeitos podem ser classificados de maneira geral em empenamentos, colapso, rachaduras e encruamento (GALINA e JANKOWSKY, 2013).

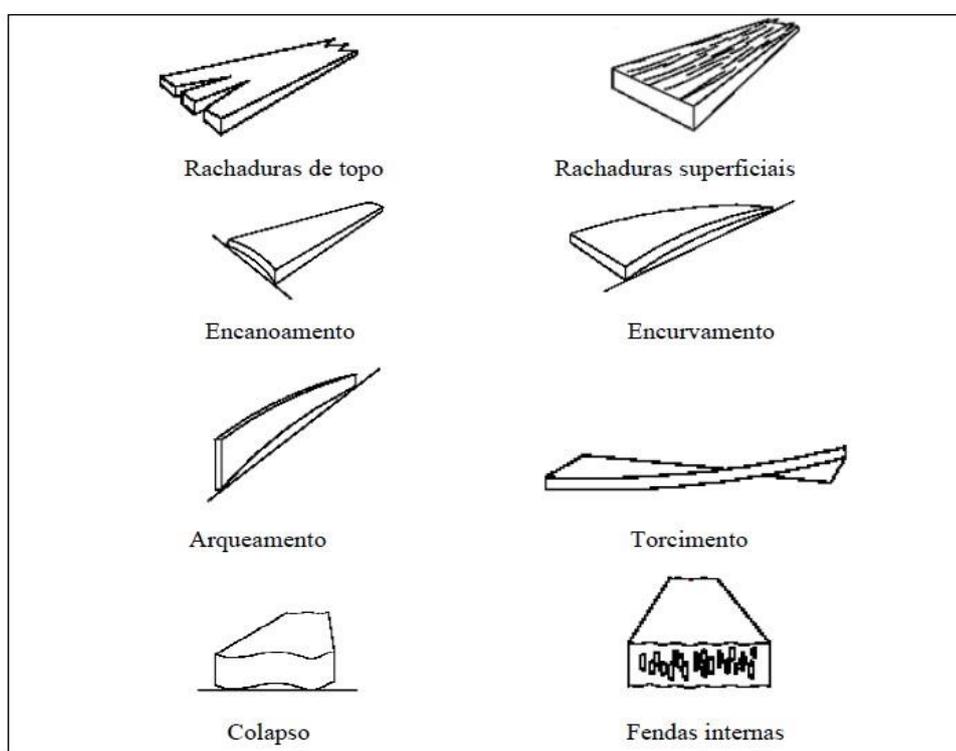
Empenamentos: são distorções dimensionais na madeira, podendo ser encanoamento, encurvamento e torcimento (KIENE, 1997).

Colapso: “[...] pode ser caracterizado por ondulações nas superfícies da peça de madeira, sendo basicamente ocasionado por forças geradas durante a movimentação capilar, as quais deformam as células” (CINIGLIO, p.16, 1998).

Rachaduras: Galvão e Jankowsky (1985) descrevem em seus estudos que as rachaduras ocorrem pela existência de diferenças de retração e umidade entre regiões contíguas da madeira no processo de secagem.

Encruamento: São caracterizados por uma secagem desuniforme ou muito rápida (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985). Kiene (1997) apud McMiller (1963) que o encruamento é uma condição de deformação e tensão permanente, onde as suas fibras externas sofrem compressão e internas tração, após a madeira ter sido seca uniformemente.

Figura 6 Principais defeitos ocasionados pela secagem.



Fonte: Almeida (2011) adaptação de Mendes.*Et.al* (1998).

Klitzke (2002) ressalta que as causas principais dos defeitos são: secagem muito rápida, secagem muito lenta, gradeamento inadequado, erros de operações e planos de secagem errôneos, características da madeira em si, como ataque de fungos e defeitos estruturais.

Segundo Melo (2005) todos os defeitos devem a variações de temperatura e umidade na estufa, tendo como método para minimizar os mesmos o ajuste correto das variáveis causadoras dos defeitos, ressaltando assim a fundamental importância de projetos e métodos de controle das mesmas e da secagem em si, conseguindo desta forma, a utilização da câmara de secagem em faixas seguras de operação.

## 2.13 **Constituição geral dos secadores**

### 2.13.1 Materiais da sua estrutura

Os materiais que constituem a estrutura física dos trocadores irão determinar o isolamento térmico e durabilidade do secador, de forma geral, estes podem ser de alumínio, concreto e madeira (JANKOWSKY, 2000).

Alumínios: podem ser construídos com um revestimento de fibra de vidro, são escolhidos devido a boa capacidade de dilatação térmica, e boa durabilidade diante da corrosão o que o faz eficiente para o trabalho em altas temperaturas, deve-se cuidar de furos para não acarretar a diminuição do rendimento, a maioria dos secadores são constituídos de alumínio (SIMPSON, 1991). Ainda segundo o mesmo autor, a isolação térmica destes é feita de fibra de vidro ou de espuma rígida, para evitar corrosão as estufas são pintadas ou pulverizadas.

Concreto: caiu em desuso, estes possuem materiais isolantes como revestimento, são usados para as mais diversas faixas de temperatura, devem ser usados materiais de grande qualidade para que sua estrutura possa ter durabilidade (SIMPSON, 1991). O mesmo autor relata que o principal problema do uso do concreto é aparição de rachaduras causadas devido ao aumento de temperatura no secador, boas práticas de manutenção, como um revestimento com material anti-corrosivo e resistente a vapor, as rachaduras de tamanho considerável devem ser preenchidas com argamassa.

Madeira: são limitados a uso em temperaturas extremamente baixas de secagem, são usados em escalas caseiras (SIMPSON, 1991).

### 2.13.2 Sistemas de aquecimento e energia da estufa

Segundo Almeida (2011) as indústrias possuem duas fontes de energia para aquecimento: elétrica e a térmica. Simpson (1991) relata em seus estudos, que a estufa precisa de calor para as seguintes finalidades: aquecimento da madeira, evaporação da umidade, manter o calor constante na estufa, aquecer o ar de entrada da estufa. Almeida (2011) fala que nos secadores a energia elétrica e térmica são usadas, muitas vezes em conjunto, onde a energia elétrica é usada para circulação do ar e a térmica para o aquecimento em geral da estufa.

Klitzke (2002) relata que a energia gasta nos secadores equivale a 50% dos gastos totais da produção, este ainda cita que Koch (1971) em seus estudos estimou que a energia gasta para o aquecimento dos secadores convencionais equivale a 80% dos gastos totais de energia.

Comumente, a energia térmica é obtida através do uso de caldeiras ou intercambiadores, que utilizam os resíduos como cavacos, como combustível, é ressaltado que o uso deste método de obtenção de energia térmica é viável economicamente falando, visto que possuem um custo de implementação relativamente baixo e pode utilizar próprios resíduos da madeira (ALMEIDA, 2011).

Figura 7 Caldeira usada tipicamente na região do Mato Grosso no processo de aquecimento.



Fonte: ALMEIDA (2011)

Galvão e Jankowsky (1985) em seus estudos descrevem que o aquecimento pode ser obtido através de sistemas de vapor, óleo térmico ou elétrico. Simpson (1991) descreve estes (sistemas de vapor, óleo térmico, elétrico) da seguinte maneira:

Sistemas de vapor: é o mais utilizado nos secadores, o deslocamento do vapor ocorre através de canos, os quais estes as movem para a circulação do ar dentro da estufa, como fonte energética é usada os resíduos da própria madeira, além do gás e derivados do petróleo.

Óleo térmico: nos Estados Unidos é um meio pouco usado, é encontrado mais em construções caseiras e de pequeno porte onde o uso de caldeiras são inviáveis, além da água pode ser usado o óleo.

Sistemas elétricos: São usados com maior frequência em secagem forçada (présecagem) ou a vácuo para geração dos meios de secagem (radiofrequência, microondas entre outros).

Sobre as transferências de calor Galvão e Jankowsky (1985) e Melo (2005) que o ar é aquecido por radiadores e então forçados a circular pela estufa através do sistema de ventilação.

Kiene (1997) em seus estudos, relata que trocadores de calor de tubos aletados recebem o ar com vapor saturado e aquecem o ar circulante na estufa e para não ocorrer exposição da madeira a radiação emitida dos trocadores de calor é feita uma blindagem no teto isolando os trocadores.

Segundo Simpson (1991) existem dois tipos de sistemas de aquecimento os diretos onde o calor é irradiado para a estufa pelo uso de trocadores de calor e os indiretos em que os gases aquecidos são inseridos diretamente na estufa de secagem.

### 2.13.3 Trocadores de calor

Os trocadores de calor são caracterizados como meios para a transferência de calor de uma fase quente para a uma fase fria (FOUST *Et al.*, 2015).

Trocadores de calor geralmente são classificados de acordo com seu escoamento ou tipo de construção, seus escoamentos podem ser paralelos, contracorrente ou cruzado (INCROPERA *Et. al*, 2008). Moran *Et.al* (2013) em sua obra é relatado que o tipo de trocador de calor mais comum é o qual o fluido é separado do outro fluido por uma parede através da qual a energia é conduzida, estes são conhecidos como recuperadores. Foust *Et.al* (2015) que os trocadores de calor mais simples são do tipo tubulares, são caracterizados pela existência de dois tubos com a passagem dos fluidos em contracorrente ou paralelos, suas dimensões são padronizadas, para a troca térmica é necessário um conjunto maior de tubos.

Segundo Incropera *Et.al* (2008) de maneira sucinta os tipos de escoamentos podem ser explicados da seguinte forma:

- Escoamento paralelo: possuem o escoamento em sentidos iguais;
- Escoamento contracorrente: os escoamentos são em sentidos opostos;
- Escoamento cruzado: os fluidos escoam de maneira perpendicular.

Foust *Et.al* (2015) fala que quando a troca térmica é de grandes proporções é recomendado o uso do trocador de casca e tubo, na sua forma mais simples, ou seja de apenas um passe, o fluido circulante nos tubos entra pelo cabeçote, sendo distribuídos pelos conjuntos de tubos em um regime paralelo e sai pelo outro cabeçote, o fluido quente pode ser tanto o de dentro do tubo como o que passa por eles, a superfície dos tubos ainda podem ser aumentados com uso de aletas, aumentando assim a taxa da troca térmica.

Incropera *Et.al* (2008) relata que quando a transferência de calor é de grande porte, usase a classe especial de trocadores denominados, trocadores compactos, são usuais quando um dos fluidos na troca térmica é um gás, são caracterizados por grandes matrizes de tubos aletados.

#### 2.13.4 Sistemas da circulação do ar

A circulação do ar é uma das etapas mais importantes na secagem, Kiene (1997) relata que as velocidades do ar por volta de 2m/s são as mais rentáveis, este mesmo autor cita que Rasmussen (1968) fala em seus estudos que velocidades maiores podem ser menos eficientes na secagem, Santini (1996) fala em sua pesquisa que velocidades acima de 3 m/s podem ser vantajosas em altas temperaturas, quando utilizadas em madeiras com grandes teores de umidade, de maneira geral a velocidade do ar deve ser maior em seu início e ir diminuindo ao passar do tempo no processo.

Galvão e Jankowsky (1985) exalta em sua pesquisa que a circulação do ar tem como principais finalidades no secador a transferência de calor e aquecimento, distribuição uniforme de calor, condicionar o ar antes da passagem pela madeira e por fim remoção da água do produto em questão.

Os *dampers* ou janelas são os componentes responsáveis para a renovação do ar dentro da estufa, os quais entram em circulação pelo uso dos ventiladores (JANKOWSKY, 1995).

Os ventiladores são posicionados nas laterais da madeira ou sobre a blindagem e acima da madeira, os *dampers* devem ser localizados de maneira estratégica para renovação do fluxo de ar (KIENE, 1997).

### 2.13.5 Ventiladores

Fox *Et.al* (2011) em sua obra fala que a força motriz para manter o escoamento quando gases são os ventiladores ou sopradores e que as mesmas leis físicas que regem os sistemas de bombas também são aplicáveis nos ventiladores.

Segundo Foust *Et.al* (2015) Os ventiladores para deslocamento de massas de ar, trabalham com volumes de ar iguais de entradas e saídas, exercendo a função de movimentadores de ar, seu desempenho só pode ser obtido através de análises e ensaios reais, apesar disso, pode-se fazer algumas considerações de forma geral: o volume de gás deslocado varia proporcionalmente com a velocidade da ventoinha; sua pressão estática varia ao quadrado da velocidade do ventilador; seu consumo de potência varia ao cubo com a velocidade (SIMPSON, 1991).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Metodologia

A pesquisa foi baseada em bibliografias de autores de renome na área da tecnologia de secagem da madeira. Através de dados teóricos foram retiradas as primeiras premissas sobre o projeto, e assim, pode se obter informações sobre tipos de curva de secagem, análise de qualidade do produto final, componentes e funcionamento dos secadores e seu controle.

A partir destas informações, houve a filtração de dados para extrair somente o essencial ao corpo da pesquisa, conseguindo assim montar os tópicos que seriam abordados no trabalho e estipular metas para alcança-los.

Porém, apenas a abordagem teórica em um tema de tamanha abrangência e importância na região serrana de Santa Catarina, não condizem com os resultados esperados. Visando a demonstração da secagem e o dimensionamento do secador de *Pinus* para a serra catarinense decidiu-se efetuar uma pesquisa de campo para coletar informações relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

Com a ajuda do embasamento referencial, foi montado um questionário base para a padronização e coletas de informações, o qual se encontra em anexo. A pesquisa de campo foi realizada da seguinte forma:

- Entrado contato com as empresas de desdobramento de madeiras da região, foram marcadas visitas para coletas de dados às que se dispuseram.
- Houve contato com empresas de projetos de máquinas térmicas para aquisição de dados com as que se disponibilizaram.

Após a fase de coleta de informações foi realizado um experimento com um modelo de pilha de madeira para estipular o tempo de secagem nos períodos de primavera-verão na região. A umidade inicial foi estipulada por amostragem no método da estufa, então todas as peças do modelo foram pesadas para a estimativa de perdas de umidade ao decorrer dos dias. Os dados coletados, também foram catalogados e analisados de acordo com a importância para o aprimoramento dos secadores, sendo necessária a análise completa da máquina fluido-térmica, visto que um componente influencia, mesmo de que de maneira indireta no funcionamento do outro.

## 3.2 Secagem ao ar livre

### 3.2.1 Dados coletados em campo

É notável o uso de métodos empíricos e de conhecimentos práticos de cada empresa, algumas ainda, utilizam a secagem ao ar livre como um método de pré-secagem até chegar ao ponto de saturação de fibras, entorno de 25%, usando posteriormente estufas.

O tempo de duração do processo é volátil, já que por ser ao ar livre não existem possibilidades de controle das variáveis envolvidas na troca de calor e massa entre o fluido secante e o sólido a ser secado.

Quadro 1 Tempo de secagem estimado

Madeira	Tempo de secagem (em dias)	Teor final de umidade (em %)
“Madeira A”	25	18
“Madeira B”	20	17
“Madeira C”	25	16
“Madeira D”	20	17
“Madeira E”	20	17
“Madeira F”	25	18
“Madeira G”	20	16
“Madeira H”	35	22

Fonte: O autor (2018)

O quadro acima demonstra a estimativa de tempo de secagem na melhor das hipóteses climáticas segundo as madeiras entrevistadas nesta pesquisa. Vale ressaltar que todas possuem como meio de medição de umidade o uso de medidores elétricos, apesar de ser um método prático e de fácil uso, com resultado imediato, seus dados podem ser imprecisos em valores acima de 30% de umidade, entretanto para produções em larga escala fica inviável o uso de outros métodos no processo ao ar livre.

Quando inverno, a maioria relatou que o tempo estimado, com as peças gradeadas, pode atingir até 50 dias, chegando em níveis de umidade entorno de 18%, algumas madeiras ainda relataram que neste período é preferível espaçamentos maiores na pilha da madeira para acelerar a secagem, com isso a um ganho de passagem de ar entre as pilhas aumentando a massa de ar e consequentemente o processo de troca de calor e massa.

Na parte de controle nenhuma empresa chegou a comentar ou relatar sobre, não existem dados em relação a quantidade de defeitos, ou de gastos no processo, sendo estes, ainda, somados na parte de gastos totais da empresa.

### 3.2.2 Método de realização de experimento

Primeiro foi estimado a umidade pelo método da estufa, para se ter uma certa noção a umidade inicial das outras peças de madeira, após a estimativa da umidade inicial foi feito um modelo de pilha de madeira similar com as encontradas nas madeireiras, com o advento de seu tamanho ser inferior as encontradas na pesquisa de campo.

A umidade inicial das peças da madeira foi calculada a partir do método da estufa a 105°C até estas atingirem a estabilidade da sua massa. Acabou sendo utilizado duas amostras de 1 metro de comprimento com espessura de 23 milímetros e largura de 15 centímetros, estas por sua vez foram contadas ao meio, formando ao final um total de quatro amostras.

As duas amostras iniciais foram confeccionadas a partir de duas tabuas “verdes” que foram retirados 45 centímetros de cada lado.

Para a estimativa da umidade inicial as peças foram pesadas antes do processo de secagem na estufa, tendo os seguintes valores:

- Amostra 1: 1776 gramas;
- Amostra 2: 1744 gramas;
- Amostra 3: 1778 gramas;
- Amostra 4: 1714 gramas.

Após acompanhamentos periódicos foi percebido que as perdas de umidade das amostras estavam começando a atingir valores insignificantes. Nesse período os valores das massas eram respectivamente:

- Amostra 1: 856 gramas
- Amostra 2: 758 gramas
- Amostra 3: 758 gramas
- Amostra 4: 758 gramas

Com os dados da massa úmida e da massa seca, finalmente é possível obter a umidade inicial da madeira:

Equação 16 Umidade inicial da madeira

$$U = \frac{Mu - Ms}{Ms} \cdot 100$$

Onde:

Mu- massa úmida

Ms- massa seca

Posteriormente foi calculada a média aritmética:

Equação 17 Média aritmética

$$\text{Média aritmética} = \frac{\sum x_n}{n}$$

$\sum$  - somatória

$X_n$  – os termos que se quer obter a média;

$N$  - número de termos.

Para poder estimar qual seria a menor umidade de equilíbrio possível foi utilizado a fórmula da média dos dados sobre o clima, e após este procedimento foi utilizado a equação 5.

$$UE = \left[ \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot h}{1 + K_1 \cdot K_2 \cdot h} + \frac{K_2 \cdot h}{1 - K_2 \cdot h} \right] \cdot \frac{1800}{W}$$

$$h = \text{umidade relativa}\% \cdot \frac{1}{100}$$

Para cálculo, utilizou-se os dados referentes a um período de um ano, calculando a média aritmética da temperatura e umidade.

### 3.3 Secadores

#### 3.3.1 Aprimoramentos

As análises para futuros aprimoramentos foram realizadas através do uso de bibliografias, cálculos e dados coletados em campo, fazendo comparações entre cada pressuposto e alternativas para o aperfeiçoamento da máquina fluidotérmica.

Na análise e dimensionamento estrutural foi utilizado além do método bibliográfico e dados coletados em campo foram utilizadas as seguintes fórmulas:

Equação 18 Resistência térmica na condução

$$R = \frac{L}{Ak}$$

R- resistência ao fluxo de calor;

L- espessura;

Área;

k- condutividade térmica.

Equação 19 Equação empírica de Churchill-Chu

$$Nu = h \cdot \frac{L}{K_f} = \frac{0,68 + 0,67 Ra^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}}$$

Nu-Número de Nusselt;

h-coeficiente de superfície;

L-espessura;

$K_f$ -condutividade térmica;

Ra-Número de Rayleigh;

Pr-Número de Prandtl.

Equação 20 Número de Prandtl

$$Pr = \frac{\vartheta}{\alpha}$$

Pr-Número de Prandtl;

$\vartheta$ -viscosidade cinemática;

$\alpha$ -difusividade térmica.

Equação 21 Número de Rayleigh

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) L^3}{\vartheta \cdot \alpha}$$

Ra-número de Rayleigh;

g-gravidade;

T<sub>s</sub>-Temperatura da superfície;

T<sub>∞</sub>- Temperatura ambiente;

L-espessura;

ϑ-viscosidade cinemática;

α-difusidade térmica.

β-coeficiente de expansão térmica.

Equação 22 Coeficiente de expansão térmica

$$\beta = \frac{1}{T_\infty}$$

Equação 23 Resistência na convecção

$$R_c = \frac{1}{h}$$

Equação 24 Perda de calor na parede

$$q = \frac{T_s - T_\infty}{R_k + R_c}$$

q-fluxo de calor.

Para o dimensionamento dos ventiladores:

Equação 25 volume total da massa de água por ar seco

$$V = \frac{12,38 + 19,94 \cdot H_2}{(H_2 - H_1)}$$

V- volume;

H<sub>1</sub>- quantidade de água por ar seco de entrada;

H<sub>2</sub>- quantidade de água por ar seco dentro do secador.

Equação 26 Equação da energia para fluidos compressíveis

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 + q = h_2 + g \cdot z_2 + Y$$

h<sub>1-2</sub>-entalpia especifica inicial e final;

c<sub>1-2</sub><sup>2</sup>- velocidade inicial e final;

g- gravidade;

q- fluxo de calor;

z<sub>1-2</sub>- altura inicial e final.

Equação 27 potência

$$P = Y \cdot \rho \cdot Q$$

P- potência;

Y- trabalho especifico;

Q- vazão.

Equação 28 Rotação do motor

$$n = \frac{\frac{120 \cdot hz}{p\phi}}{60}$$

n- rotação do motor;

hz- frequência;

po- número de polos.

Equação 29 rotação específica

$$n_{esp} = 10^3 \cdot n \cdot \frac{Q^{0,5}}{Y^{0,75}}$$

$n_{esp}$ = rotação específica;

Q- vazão;

Y- trabalho específico.

Equação 30 Coeficiente de pressão

$$\varphi = 221,121 \cdot n_{esp}^{-1,022}$$

Equação 31 Diâmetro externo

$$D_e = \frac{\sqrt{2 \cdot Y / \varphi}}{\pi \cdot n}$$

Equação 32 número de pás

$$n_{pas} = 19,993 - 4,932 \cdot 10^{-2} \cdot n_{esp} + 4,650 \cdot 10^{-5} \cdot n_{esp}^2 - 1,412 \cdot 10^{-8} \cdot n_{esp}^3$$

Equação 33 Altura do distribuidor

$$b_0 = (0,449 - 34,026 \cdot n_{esp}) \cdot D_e$$

Equação 34 Relação de cubo

$$r = 0,272 + 83,234 \cdot n_{esp}^{-1}$$

Equação 35 Diâmetro interno

$$D_i = r \cdot D_e$$

Equação 36 Vazão para o ponto de máximo rendimento para distribuidor fixo de rotor-helice

$$Q_{max} = n_v \cdot Q$$

$Q_{max}$  = vazão no ponto de maior rendimento;

$n_v$  = rendimento do rotor.

Equação 37 Passo interno

$$p_i = \frac{\pi \cdot D_i}{n_{pas}}$$

Equação 38 comprimento da coroa do perfil no diâmetro interno

$$L_i = (1,689 + 2,368 \cdot 10^{-3} \cdot n_{esp} - 7,235 \cdot 10^{-6} \cdot n_{esp}^2 + 4,302 \cdot 10^{-9} \cdot n_{esp}^3) \cdot p_i$$

Equação 39 Velocidade meridional média

$$c_m = \frac{4 \cdot Q_{max}}{\pi \cdot (D_e^2 - D_i^2)}$$

Equação 40 Velocidade tangencial no diâmetro interno

$$u_i = \pi \cdot n \cdot D_i$$

Equação 41 Componente da velocidade absoluta na direção tangencial no diâmetro interno.

$$0,5 \cdot \Delta c_{ui} = \frac{Y \cdot nh}{2 \cdot u_i}$$

nh- rendimento hidráulico.

Equação 42 Ângulo que a direção do escoamento não perturbado forma com a direção tangencial no diâmetro interno

$$\beta_{\infty i} = \arctg \frac{cm}{u_i - 0,5. \Delta c_{ui}}$$

Equação 43 Velocidade relativa do escoamento não perturbado no diâmetro interno

$$w_{\infty i} = \frac{c_m}{\text{sen} \beta_{\infty i}}$$

Equação 44 Coeficiente de sustentação do perfil no diâmetro interno

$$C_{si} = \frac{2. Y. nh}{n_{pas} \cdot n. L_i. w_{\infty i}}$$

Fórmulas para as seções:

Equação 45 Diâmetros das seções

$$D_j = D_{j-1} + \frac{D_p - D_i}{n_s}$$

$n_s$ - número de seções;

$D_p$ -diâmetro externo;

$D_{j-1}$ - diâmetro da seção anterior;

$D_{j-1}$ -diâmetro da seção.

Equação 46 Velocidades tangenciais

$$u_j = \pi. n. D_j$$

Equação 47 Componentes da velocidade absoluta na direção tangencial

$$0,5. \Delta c_{uj} = \frac{Y. nh}{2. u_j}$$

Equação 48 Ângulos que a direção do escoamento não perturbado forma com a direção tangencial

$$\beta_{\infty j} = \operatorname{arctg} \frac{cm}{u_j - 0,5 \cdot \Delta c_{uj}}$$

Equação 49 Velocidade relativa do escoamento não perturbado

$$w_{\infty j} = \frac{c_m}{\operatorname{sen} \beta_{\infty j}}$$

Equação 50 Passos sem considerar a espessura das pás

$$p_j = \frac{\pi \cdot D_j}{n_{pas}}$$

Equação 51 Comprimento em verdadeira grandeza da corda dos perfis

$$L_j = \frac{L_i \cdot \cos \beta_{\infty i} \cdot D_j}{D_i \cdot \cos \beta_{\infty j}}$$

Equação 52 Força que atua na pá no diâmetro médio  $0,3 \cdot H$

$$F = 325 \cdot H \cdot (L_i - L_e) \cdot (D_e - D_i)$$

$L_e$ - corda do perfil externo

Equação 53 Momento fletor

$$M_f = F \cdot \frac{(D_e - D_i)}{4}$$

Equação 54 Espessura para o diâmetro interno

$$E_{gi} = 1,139 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{M_f}{L_i}}$$

Equação 55 Espessura para o diâmetro externo

$$E_{ge} = 0,33 \cdot E_{gi}$$

Equação 56 Espessura para os demais diâmetros

$$E_{gj} = \frac{E_{gi} \cdot D_e - E_{ge} \cdot D_i (E_{gi} - E_{ge}) \cdot D_j}{D_e - D_i}$$

Equação 57 Fator de engrossamento ou afinamento para diâmetro interno

$$f_i = \frac{E_{gi} \cdot 0,122}{L_i}$$

Equação 58 Ordenada superior dos perfis em seu centro de gravidade perfil interno

$$y_{gi} = 0,5 \cdot E_{gi} + 0,014 \cdot f_i \cdot L_i$$

Equação 59 Fator de engrossamento ou afinamento diâmetro externo

$$f_e = \frac{E_{ge} \cdot 0,08}{L_e}$$

Equação 60 Ordenada superior do perfil em seu centro de gravidade do perfil externo

$$y_e = 0,5 \cdot E_{ge} + f_e \cdot L_e$$

Equação 61 Ordenadas superiores dos demais perfis

$$y_{gj} = \frac{y_{gi} \cdot D_e - y_{ge} \cdot D_i - (y_{gi} - y_{ge}) \cdot D_j}{D_e - D_i}$$

Equação 62 Ordenadas máxima do perfil interno

$$y_{maxi} = 1,02 \cdot E_{gi} + 0,011 \cdot f_i \cdot L_i$$

Equação 63 Ordenada máxima do perfil externo

$$y_{maxe} = 1,02 \cdot E_{ge} + 0,008 \cdot f_e \cdot L_e$$

Equação 64 Ordenada máxima dos demais perfis

$$y_{gj} = \frac{y_{maxi} \cdot D_e - y_{maxe} \cdot D_i - (y_{maxi} - y_{maxe}) \cdot D_j}{D_e - D_i}$$

Equação 65 Ângulos de escorregamento

$$\lambda_j = \text{arc tg} \left[ 0,012 + 0,06 \cdot \left( \frac{y_{maxj}}{L_j} \right) \right]$$

Equação 66 Coeficientes de sustentação considerando o arrasto

$$C_{sj} = \frac{2 \cdot Y \cdot nh}{n_{pas}} \cdot \left( \frac{\text{sen } \beta_{\infty}}{L \cdot w_{\infty} \cdot \text{sen}(\beta_{\infty} - \lambda)} \right)^j$$

Equação 67 Razão do coeficiente de sustentação que considera o arrasto e a influência de uma pá sobre a outra e o que considera somente o arrasto

$$\left(\frac{C'_s}{C_s}\right)_j = 1 + \left(1,34 - \frac{t}{L}\right)_j \cdot [tg(55,131 - 0,29 \cdot \beta_\infty - 0,0881 \cdot \beta_\infty^2 + 0,00122 \cdot \beta_\infty^3)_j]$$

Equação 68 Coeficiente de sustentação considerando o arrasto e a influência de uma pá sobre a outra

$$C'_s = \left(\frac{C'_s}{C_s}\right)_j \cdot C_{sj}$$

Equação 69 Ângulos de ataque

$$\delta = 10,8696 \cdot \left[ C'_s - 4,8 \cdot \left(\frac{y_{max}}{L}\right)_j \right]$$

Equação 70 Ângulos que a reta paralela ao eixo x passa no centro de gravidade do perfil

$$\beta_j = (\beta_\infty - \delta)_j$$

$$\beta_{mj} = 0,5 \cdot (\beta_\infty + \beta)_j$$

Equação 71 Ângulos do escoamento não perturbado na entrada do rotor

$$\alpha_{\infty j} = \text{arc tg} \frac{c_m}{0,5 \cdot \Delta c_{uj}}$$

Equação 72 Rendimento dos perfis não considerando as perdas junto aos diâmetros interno e externo

$$n_{rj} = 1 - \left(\frac{w_\infty}{u \cdot \text{sen}(\beta_\infty - \lambda)}\right)_j$$

### 3.3.2 Dados de Coletados em campo

O uso de estufas para a secagem de madeira é um meio de agilizar o processo, padronizar o tempo para o mesmo, e ainda, a capacidade de atingir índices de umidade menores do que a umidade de equilíbrio da região.

A condição típica do inverno serrano obriga as grandes madeireiras o uso de maquinários, produtos e secadores para acelerar a secagem, como citado anteriormente, que pode demorar até 50 dias, não atingindo valores abaixo de 16%, para quem demanda do tempo e baixos teores de umidade o uso de secadores é de fundamental importância.

Na pesquisa de campo foi coletado dados de 4 madeireiras que utilizam tais equipamentos, dessas, duas utilizavam o ar livre como pré-secagem, estruturalmente falando mudavam poucas características, todas relataram problemas com o índice de umidade das pilhas superiores dentro da estufa, necessitando retrabalho, e de difícil uniformidade na umidade final.

Quase todos eram feitos com paredes de alvenaria e portas de alumínio para facilitar a abertura das mesmas, das quatro empresas visitadas uma usava como isolamento térmica fibra de vidro.

Os dados são coletados por sensores e transmitidos para o computador onde o responsável técnico pode trabalha-los, alterando as curvas e fases de secagem, à campo foi apurado que o operador da estufa geralmente é o caldeirista sendo feito um treinamento pelos próprios desenvolvedores do sistema de automação da estufa.

As curvas de secagem são pré-determinadas pela empresa desenvolvedora da automação, porém podem ser mudadas a qualquer instante, nesse estudo o enfoque foi sobre as de *Pinus*, mas dentre os sistemas de automação foi relatado a existência de diferentes curvas de secagem de acordo com a espécie da madeira.

O aquecimento de três das quatro empresas se deve por meio de caldeiras e vapor, um fato interessante, que a única empresa que não utiliza a caldeira para o aquecimento, usa um sistema patenteado, embasado no uso de uma fornalha e tubulação dentro do próprio secador. A alimentação das caldeiras é feita de forma automática através de esteiras, em três madeireiras usando cavacos e sobras, uma, porém, utiliza lenha para aquecimento da caldeira

Os ventiladores e *dampers* são proporcionais em quantidade, o número de pares de *dampers* é o mesmo de ventiladores, os quais são ativados automaticamente para atingir as temperaturas de bulbo úmido e seco desejadas, entre diferenciais, que se vale ressaltar, foi o uso, em uma das amostras de controle, de uma cobertura sobre o teto da estufa, segundo o

responsável, a utilização desta medida propiciou a diminuir quatro horas no tempo de secagem, além de aumentar a vida útil da estrutura da estufa.

Os trocadores de calor utilizados na maioria das empresas são do tipo radiador, compostos de tubos com sua superfície aumentada por aletas, são dispostos em conjuntos em forma de placas, embaixo do conjunto trocador-ventilador é colocada uma superfície metálica para evitar qualquer dano a madeira por meio da radiação emitida dos mesmos.

Nenhuma utiliza de aspersão ou algo do gênero, foi também ressaltado que apesar da necessidade de uma madeira seca para exportação, por não ter uma finalidade nobre, a peça final pode conter leves defeitos em sua estrutura, todas ressaltaram que para móveis e madeiras como o Eucalipto a aspersão e demorados planos de secagem, contendo todas as etapas para uniformização e diminuição das tensões na peça.

Apenas uma empresa de desdobramento de madeiras utiliza algum tipo de controle de qualidade, o qual se baseia na verificação antes da embalagem, feita pelos próprios funcionários, mas que dificilmente é eliminado alguma, já que possui uma certa tolerância para defeitos.

No que se diz respeito ao controle de gastos, os administradores responsáveis pelas finanças incorporam todos os custos dos secadores nos gastos totais da empresa, não conseguindo, então, estimar em valores a manutenção mensal dos secadores. Ainda sobre valores, uma das madeireiras que recém adquiriu um secador, relatou que com todo o sistema de aquecimento, controle e estrutural o investimento foi de aproximadamente de meio a um milhão de reais.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Secagem ao ar livre**

#### **4.1.1 Influência do clima**

Por ser uma secagem dependente do ambiente externo, é de grande importância a avaliação do clima e seus fatores para balizar sua viabilidade econômica, analisando todos os cenários possíveis, conseguindo adotar o melhor método para sua realização.

A obra de Nimer (1989) nos fala de aspectos de grande significância em relação a climatologia da região sul brasileira, sendo, as que valem destacar, para o estudo em questão, as seguintes:

**Uniformidade:** Possui níveis pluviométricos e de umidade uniformes, quando comparado com as outras regiões brasileiras, caracterizando como um clima mesotérmico temperado, podendo existir um pequeno período de seca, mas não definido.

**Faixa de temperatura:** No que diz respeito as características do planalto serrano catarinense, este está em uma faixa de temperaturas amenas com médias anuais de 16°C a 18°C em altitudes entre 750 e 1000 metros. Existe ainda, uma pequena parte da região sul brasileira, que possui algumas cidades da região em estudo, compreendida do planalto Vacaria-Lages-São Joaquim, em faixas de altitude de mil metros, a temperatura fica na faixa de 14 °C anuais, e na região do pico mais alto de Santa Catarina, o Morro da Igreja, as temperaturas anuais ficam entre 10 °C.

Apesar da obra de Nimer (1989) ter sido escrita há quase trinta anos, os níveis de umidade e temperatura coletados pelo Instituto Nacional de Meteorologia, na cidade de maior expressão da região serrana de Santa Catarina, Lages, são muito próximos com os relatados, com verões de médias não superiores à 22 °C e invernos rigorosos, antagônicos quando comparados ao verão.

Quadro 2 Índices climatológicos de Lages

Ano	Estação	Média das temperaturas máximas (°C)	Médias das temperaturas mínimas (°C)	Médias das umidades máximas (%)	Médias das umidades mínimas (%)	Média das velocidades do vento (m/s)
2018	Inverno	12,7383	11,6977	87,058	82,3061	2,4897
2017	Primavera	20,509	19,1962	77,3152	70,5197	3,6863
2018	Outono	15,5228	14,4975	86,5960	81,6182	2,67
2017-2018	Verão	20,1239	18,9798	84,4937	78,4062	2,8935

Fonte: Adaptado, Instituto Nacional de Meteorologia (2018)

Através da fórmula da média aritmética é possível facilmente calcularmos a temperatura anual de Lages, assim como seu índice de umidade:

$$\text{Média aritmética} = \frac{\sum x_n}{n}$$

Aplicando a fórmula para temperatura temos para as máximas:

$$\frac{12,7383 + 20,509 + 15,5228 + 20,1239}{4} = 17,2235 \text{ °C}$$

E para as temperaturas mínimas:

$$\frac{11,6977 + 19,1962 + 14,4975 + 18,9798}{4} = 16,0928 \text{ °C}$$

Agora para umidades máximas:

$$\frac{87,058 + 77,3152 + 86,5960 + 84,4937}{4} = 83,865725\%$$

Para as umidades mínimas:

$$\frac{82,3062 + 70,5197 + 81,6182 + 78,4072}{4} = 78,212825\%$$

Ainda, para velocidade do vento anual:

$$\frac{2,4897 + 3,6863 + 2,67 + 2,8935}{4} = 2,934875 \text{ m/s}$$

Com estes dados adicionados às afirmações de Nimer (1989), é possível obter uma razoável noção sobre a secagem ao ar livre desta região, mesmo com todas as peculiaridades que o clima pode nos trazer, visto que a região sul brasileira possui aspectos uniformes quando se trata de seu clima, especialmente da temperatura e umidade.

Segundo Jankowsky (1990) para a secagem ao ar livre ser eficiente em termos de velocidade são necessários índices de temperaturas altos e de umidades relativamente baixos, fluxo de ar constante entre as peças. Analisando os dados coletados sobre o clima da região é visto que o grande empecilho em um processo mais rentável é, sem dúvida, as próprias características climáticas da mesma, com níveis de temperaturas baixos, e índices de umidades relativas altos, entretanto quando é falado de qualidade e padronização do processo as temperaturas baixas e altos níveis de umidade ajudam a diminuir a ocorrência de defeitos nas peças no processo de secagem.

#### 4.1.2 Experimento

Com o levantamento de dados foram realizados os seguintes cálculos para a estimativa de umidade:

Devido a existência de 4 amostras será usada a média para a estimativa de umidade:

$$\text{Média do peso seco} = \frac{858 + 758 + 758 + 758}{4} = 783 \text{ gramas}$$

$$\text{Média do peso úmido} = \frac{1776 + 1744 + 1778 + 1714}{4} = 1756 \text{ gramas}$$

$$U = \frac{1756 - 783}{783} \cdot 100 \cong 124\%$$

Para poder saber a qual teor de umidade a madeira secada ao livre, foi calculada a umidade de equilíbrio média em Lages, de acordo com a fórmula proposta por Simpson (1971), com as temperaturas e umidades médias anuais.

$$T = \frac{17,22 + 16,1}{2} = 16,66^{\circ}\text{C}$$

Transformando para Farenheit:

$$\frac{TC}{5} = \frac{TF - 32}{9}$$

Onde:

TC- temperatura em Celcius;

TF- temperatura em Farenheit:

$$\frac{16,66}{5} = \frac{TF - 32}{9}$$

$$3,332.9 = TF - 32$$

$$TF = 29,988 + 32 = 61,988^{\circ}\text{F}$$

Fórmula para umidade de equilíbrio:

$$UE = \left[ \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot h}{1 + K_1 \cdot K_2 \cdot h} + \frac{K_2 \cdot h}{1 - K_2 \cdot h} \right] \cdot \frac{1800}{W}$$

Cálculo do  $K_1$ :

$$K_1 = 3,730 + 0,03642 - 0,000154 \cdot 61,988^2 \cong 3,1747$$

Calculando  $K_2$ :

$$K_2 = 0,6740 + 0,001053.61,988 - 0,00000174. 61,988^2 \cong 0,733$$

Calculando o  $W$ :

$$W = 216,9 + 0,01961.61,988 + 0,005720. 61,988^2 \cong 240,095$$

Calculando a pressão de vapor d'agua:

$$h = \text{umidade relativa}\% \cdot \frac{1}{100}$$

Será usado para cálculo a média aritmética das umidades relativas, das mínimas e máximas anuais:

$$\text{média das umidades} = \frac{83,87 + 78,21}{2} = 81,04\%$$

$$h = \frac{81,04}{100} = 0,8104$$

Umidade de equilíbrio:

$$UE = \left[ \frac{3,1747.0,733.0,8104}{1 + 3,1747.0,733.0,8104} + \frac{0,733.0,8104}{1 - 0,733.0,8104} \right] \cdot \frac{1800}{240,095}$$

$$\left[ \frac{1,886}{2,886} + \frac{0,594}{0,406} \right] \cdot 7,497$$

$$UE \cong 15,753\%$$

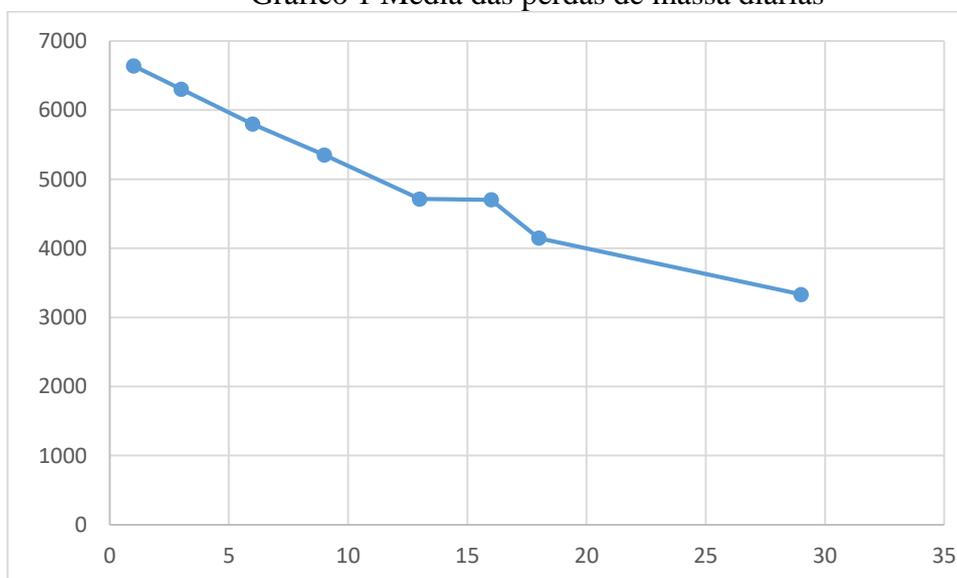
Após 29 dias de exposição ao sol foi obtido as seguintes estimativas referente a umidade média da madeira:

Quadro 3 Perda de massa diária da pilha da madeira

Dia	Massa (gramas)
1	6639,29
3	6303,57
6	5798,21
9	5351,7857
13	4714,2857
16	4701,7857
18	4148,2143
29	3332,1429

Fonte: O Autor (2018)

Gráfico 1 Média das perdas de massa diárias



Fonte: O Autor (2018).

Utilizando a fórmula da porcentagem de umidade e a quantidade de umidade estimada é possível se obter uma noção média de umidade da pilha da madeira:

$$U = \frac{6639,29 - 3332,1429}{3332,1429} \cdot 100$$

$$U = 99,25\%$$

$$U = 124 - 99,25 = 24,75\%$$

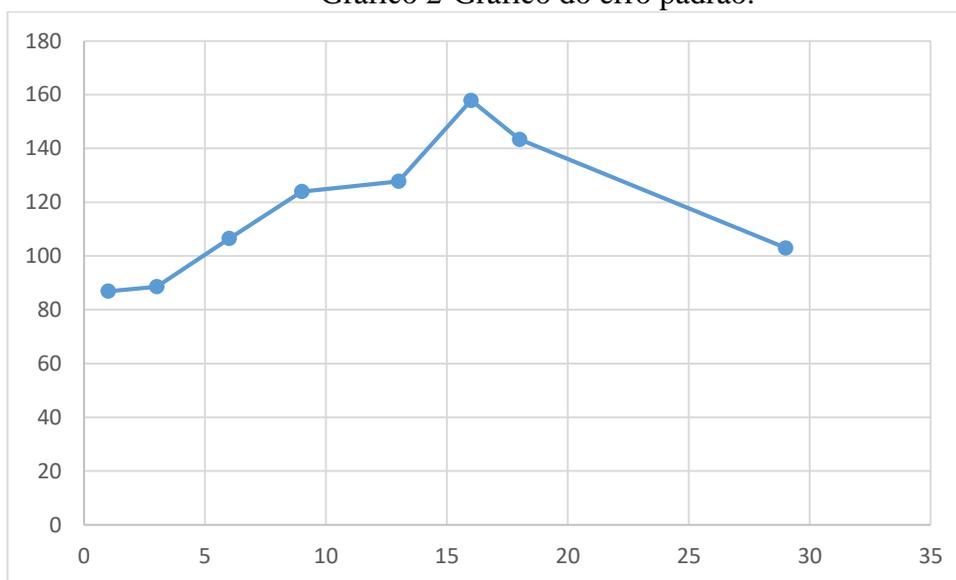
Outros dados para poder analisar os resultados experimentais são os de desvios padrões e erro, os quais serão demonstrados a seguir:

Quadro 4 Desvio padrão das madeiras na pilha

Dia	Desvio padrão (gramas)
1	459,7417
3	468,6325
6	563,6328
9	655,9531
13	676,1625
16	835,3844
18	758,8347
29	544,8775

Fonte: O Autor (2018)

Gráfico 2-Gráfico do erro padrão.



Fonte: O Autor (2018)

As estimativas de erro e desvio padrão respectivamente demonstram a dispersão dos valores das amostras, atingindo valores maiores que 600 gramas de peça para peça na amostra, o interessante de se analisar é a linearidade de aumento até o décimo sexto dia quando se tem um pico e então ocorre um decréscimo de forma linear.

#### 4.1.3 Aprimoramento da secagem ao ar livre

Os pátios para estocagem da madeira não seguem as premissas levantadas por Jankowsky (1990) para um melhor desempenho, em maioria, possuem vegetação rasteira e em alguns água empoçada, o que vai de encontro a ideia de um pátio livre de vegetação e água, seja na forma empoçada ou de açude e uso de materiais escuros no chão.

Para melhoria do processo de acordo com o que foi pesquisado, é recomendável às empresas que usam este método o estudo de viabilidade do uso de cobertura se possível, drenagem do solo, ainda, a madeira pode ser colocada em varais aumentando sua secagem devido a maior incidência do fluido secante e energia solar nas superfícies das tabuas, mas com o risco da ocorrência de empenamentos, rachaduras e variação da umidade final das peças.

### 4.2 **Aprimoramento no secador**

#### 4.2.1 Propriedades dos elementos estruturais

Os materiais para construção podem ser divididos em três grandes classes: Cerâmicos, polímeros e metais. Para a isolamento térmica, nos secadores, todos os materiais referidos na pesquisa, alvenaria, fibra de vidro e lã de rocha pertencem ao grupo dos cerâmicos

Apesar da alvenaria, fibra de vidro e lã de rocha serem da mesma classe de material, devido a engenharia e materiais de sua composição por de trás dos mesmos, possuem suas próprias peculiaridades para os devidos usos como isolante térmico. Os secadores que possuem a alvenaria como material construtivo já a utilizam como isolante, já a fibra de vidro e lã de rocha é usada em secadores com metais na sua base construtiva, geralmente são encontradas em forma de laminados e mantas.

Na região serrana as fabricantes de secadores os fabricam, tanto com lã de rocha, quanto de alvenaria, entretanto, em campo a única máquina fluido-térmica encontrada de alumínio, segundo o dono da mesma, possuía a isolamento com fibra de vidro.

Para o comprador deve ser levado em conta as propriedades do material em relação as temperaturas as quais o material vai passar e a manutenção da estrutura, já que as perdas de energia pelas fronteiras do sistema de controle interno para o ambiente externo afetam diretamente no rendimento, forçando assim todo o conjunto da máquina fluido-térmica a trabalhar além do limite pressuposto para atingir os mesmos valores nas variáveis significativas

do processo, desta forma ao adquirir um produto com tal isolamento o mesmo saberá quais são seus limites de trabalho e fazer um comparativo do custo benefício da estrutura isolante.

A capacidade térmica da alvenaria é altamente relacionada a densidade devido a menor quantidade de vazios nos materiais, os mais densos tendem a ter maior condutividade, em geral, blocos de construção cerâmicos tem sua condutividade térmica proporcional a sua densidade (RIGÃO, 2012).

A fibra de vidro é um material compósito e leve que pode ser encontrado em diversas configurações na indústria, tem como características fundamentais, sua baixa condutividade térmica, baixa densidade, não absorve umidade além de incombustível e imputrescível (MARQUES; *et.al.* 2010).

Quadro 5 Propriedades térmicas de alguns materiais isolantes

Material	Gravidade específica	Calor específico	Condutividade térmica	Difusidade
Alvenaria	1,700	837	0,658	0,046
Tijolo	1,800	840	0,45	0,031
Concreto	0,500	837	0,128	0,049
Cortiça	0,120	1880	0,042	0,03
Fibra de vidro	0,220		0,035	
Amianto	0,383	816	0,113	0,036
Carvalho	0,705	2390	0,19	0,0113

Fonte: Janna, 2016

Para a devida escolha é necessário efetuar alguns cálculos sobre as propriedades térmicas dos isolantes, pois apesar da condutividade térmica ser de grande importância existem outros fatores de igual relevância.

Uma das propriedades mais interessantes de ser avaliada seria sua resistência ao fluxo de calor, a qual quanto maior valor melhor é a isolamento térmica.

A resistência ao fluxo de calor em um objeto plano no processo de condução pode ser calculada facilmente através da seguinte fórmula:

$$R = \frac{L}{Ak}$$

Utilizando as dimensões dos blocos de construção no estudo de Al Hadhrami (2009) de 20 centímetros de largura, 20 centímetros de altura, 40 centímetros de comprimento e adotando uma área de 1 m<sup>2</sup>:

$$R = \frac{0,2}{1,0,45}$$

$$R = 0,44 \frac{K}{W}$$

Agora para a camada de concreto, segundo profissionais da construção civil é usado 2 cm de espessura:

$$R = \frac{0,02}{1,0,128}$$

$$R = 0,15 \frac{K}{W}$$

Valor total de resistência é dado pela somatória, logo:

$$\sum R = 0,15 + 0,44$$

$$R = 0,59 \frac{K}{W}$$

Por ser feito de alvenaria dupla:

$$R = 0,59 \cdot 2 = 1,19 \frac{K}{W}$$

Cálculo da espessura necessária da fibra de vidro para atingir o mesmo valor de resistência:

$$1,19 = \frac{L}{1,0,035}$$

$$L = 1,66 \cdot 0,035 = 0,042m$$

Para lã de rocha, foi relatado pelo fabricante que é usado 50 mm de mesma para isolamento, portanto efetuando o cálculo com a condutividade segundo:

$$R = \frac{0,05}{1,0,04} = 1,25 \frac{K}{W}$$

Na resistência térmica do processo de convecção é averiguado pela fórmula uma igualdade nos resultados já que é tomado como parâmetros o coeficiente de superfície e a área. Cálculo do Coeficiente de superfície.

$$Nu = h \cdot \frac{L}{Kf} = \frac{0,68 + 0,67 Ra^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}}$$

$$Pr = \frac{\vartheta}{\alpha} = \frac{15,68 \cdot 10^{-6}}{0,22160 \cdot 10^{-4}} = 0,708$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty}) L^3}{\vartheta \cdot \alpha}$$

$$\beta = \frac{1}{T_{\infty}} = \frac{1}{(20 + 273)} = 0,00341$$

$$Ra = \frac{9,81 \cdot 0,00341 \cdot (120 - 20) 1^3}{15,68 \cdot 10^{-6} \cdot 0,22160 \cdot 10^{-4}} = \frac{3,35}{3,47 \cdot 10^{-6}} = 964876,9$$

$$Nu = h \cdot \frac{1}{0,02624} = 0,68 + \frac{0,67 \cdot 964876,9^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{0,708}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}} = \frac{21,67}{1,30} = 16,68$$

$$16,68 = \frac{h}{0,02624} = h = 16,68 \cdot 0,02624 = 0,43 W(m \cdot K)$$

$$R_c = \frac{1}{h} = \frac{1}{0,43} = \frac{2,33K}{W}$$

Com a resistência de condução e convecção finalmente é possível calcular a perda de calor na parede com os respectivos isolantes:

Para alvenaria e fibra de vidro:

$$q = \frac{T_s - T_\infty}{R_k + R_c}$$

$$q = \frac{120 - 20}{1,19 + 2,33} = 28,41 W$$

Para lã de rocha:

$$q = \frac{120 - 20}{1,25 + 2,33} = 27,93 W$$

Como é observado em questões de isolamento térmica a alvenaria os isolantes térmicos usados no alumínio possuem as mesmas capacidades, entretanto o fato da alvenaria ser uma construção pelo dono da madeireira, pode sofrer mudanças construtivas e de qualidade, sendo, portanto variável a sua capacidade de isolamento.

Uma outra Situação a ser analisada, na estrutura, são os defeitos que podem ocorrer devido as mudanças de temperatura e umidade na câmara de secagem, fazendo um paralelo, agora sobre as propriedades da alvenaria e das estruturas metálicas, no caso dos secadores é usado o alumínio, é possível chegar nas seguintes premissas de análises:

- Resistencia térmica: O alumínio por ser um metal é reconhecidamente como um material maleável, diferentemente da alvenaria, que é extremamente rígida, com isso, qualquer esforço e gradiente de energia que os cerâmicos sofram pode ocorrer fissuras. Avaliando apenas o ganho de energia térmica, para que ocorra alguma mudança em ambos os materiais é necessário um ganho de mais de 300 °C, sabendo que um secador de *Pinus* funcionando com curvas de secagem de um plano de altas temperaturas, o qual

pode chegar até a 120°C, o fator temperatura em curto prazo é algo trivial (RIGÃO, 2012).

- Umidade: Diante do alumínio, a umidade pode ocasionar o fenômeno de corrosão, mas entre os metálicos o alumínio é um dos quais possui maior resistência, já na alvenaria, devido a sua porosidade ocorre o fenômeno de adsorção fluídica, quando sofre o aquecimento a água livre a evapora criando pressões internas (RIGÃO, 2012).
- Composição: Para o construído em alvenaria, este é um dos fatores determinantes, pois sua capacidade isolante, contração e retração depende de seus elementos que a constitui, o uso de materiais de baixa qualidade e tempo de cura, pode trazer perdas de eficácia e consequentemente perda de rendimento.

Segundo Simpson (1991) o material mais usado para os secadores de altas temperaturas é o alumínio, principalmente devido ao impacto dos gradientes de temperatura.

Segundo alguns fabricantes, o preço entre a alvenaria e o alumínio existe uma diferença de acréscimo de 40% do valor total, muito em virtude do preço do alumínio e da estrutura de alvenaria ser bancada pelo comprador.

Apesar do incremento do valor no preço do secador, estruturas de alvenarias podem não ser tão seguras como as de alumínio, devido as variáveis envolvidas em sua construção, tempo de cura do concreto, materiais usados em proporcionalidades corretas tipo de tijolo e revestimento do mesmo, já os de alumínio são prontos na empresa que o constrói, podendo ser usado até em processos de secagem mais ríspidos, além dos cuidados que se devem ter com secador de alvenaria por estar exposto na umidade, ainda, é recomendável a pintura dos mesmos.

#### 4.2.2 Sistema de Ventilação

Simpson (1991) relata que uma ventilação mal dimensionada pode trazer perdas de rendimento no processo e um aumento de custo de aproximadamente 25%, Almeida (2011) em sua pesquisa no estado do Mato Grosso informa a grande necessidade do dimensionamento deste, já que tanto os *damper's*, quanto os ventiladores, são escolhidos por maneira empírica, sem qualquer que seja de embasamento teórico-científico.

Na pesquisa deste referido trabalho, foi encontrado sistemas de ventilação com *damper's*, ou janelas para entrada e saída de ar, na parte superior dos secadores, disposição está geralmente em estufas de grande porte, e nas laterais encontradas em estufas menores, a

quantidade de pares de janelas para o fluxo de ar, eram proporcionais ao número de ventiladores.

A quantidade de ventiladores varia de máquina fluido-térmica, isto porque cada estufa possui características e capacidades de vazão de produção diferentes, mas em geral o range do número dos mesmos está entre 4 à 10 em estufas de 50- 110 m<sup>3</sup>, os motores de acionamento direto possuem uma média de 5 cavalos vapor com 6 polos de rotação de aproximadamente 1200 rpm.

O número de polos do motor é justificável devido a possível necessidade de um torque maior para a movimentação da estrutura do rotor, além das altas rotações que este empoe, sobre o número de ventiladores não foi possível obter algum dado de como é escolhido a quantidade, entretanto, é possível estipular de acordo com o volume do secador e a capacidade do preenchimento por ar deste. Por exemplo, um ventilador com capacidade de movimentação de 6 m<sup>3</sup>/s para preencher a totalidade de uma estufa de 60 m<sup>3</sup> levaria cerca de 10 segundos, com isto, é possível determinar que a quantidade dos ventiladores varia da necessidade e velocidade que se queira impor dentro da estufa.

Quadro 6 Dados de construção quanto ao número de ventiladores

Volume de produção	Número de ventiladores
50m <sup>3</sup>	4
60m <sup>3</sup>	6
100m <sup>3</sup>	7
120m <sup>3</sup>	10

Fonte: O Autor (2018)

Sobre problemas, o de maior relato entre todas as madeireiras visitadas foi a diferença da taxa de secagem entre as pilhas inferiores com as superiores, necessitando de retrabalho, olhando para a localização dos trocadores de calor e ventiladores, além das diferenças das características de peça para peça, a ocorrência deste problema acontece devido a movimentação do ar, já que o ar se locomove de temperaturas mais baixas para as mais altas, e, logicamente, existirá uma demora para o fluido secante chegar as partes superiores.

#### 4.2.2.1 Dimensionamento

O dimensionamento demonstrado a seguir, foi realizado seguindo as fórmulas pressupostas de Sousa (1991) com estipulações de perdas de energia e altura aparente da estufa, já que a quantidade necessária massa de ar e energia de movimentação depende muito de caso

para caso, ainda, não foi suposto as perdas devido o confronto com as pilhas da madeira, a ideia central foi demonstrar o dimensionamento de um ventilador para a vazão calculada pelas fórmula de volume de ar.

Cálculo do volume de ar a ser movimentado: foi utilizado os dados encontrados na carta psicométrica, a qual pode ser encontrada em anexo, da temperatura de 0°C com aproximadamente 90% de umidade e dentro do secador com temperatura de 82% e umidade próxima de 20%, dados os quais foram retirados de uma tabela feita por Simpson (1991) com isto foi utilizado a equação para cálculo de volume de água por ar seco, em pés e posteriormente transformado metro cúbico.

$$V = \frac{12,38 + 19,94 \cdot 0,072}{(0,072 - 3,493 \cdot 10^{-3})} = 201,67 ft \cdot 0,028 \cong 6 m^3$$

Trabalho específico: para este cálculo foi modificada a equação da energia para fluidos compressíveis, desconsiderando a diferença de pressão e o fluxo de calor, os valores iniciais, se referem a massa de ar já presente na estufa, assim como a altura do secador, os finais foram utilizados os dados referentes aos de entrada pelos *dampers*, o valor é dado em quilo joule por quilograma.

$$Y = h_2 - h_1 + g \cdot z_1$$

$$Y = 360 - 270 + 10 \cdot 9,81 = 188,1 \frac{kJ}{kg}$$

Potência: a potência foi calculada com a densidade do ar em pressão ambiente e vazão da massa total de entrada:

$$P = 188,1 \cdot 2,6 = 1354,32 \text{ Watts} \cong 2cv \cong 1471 \text{ watts}$$

Rotação do motor: o número de polos estabelecido para o cálculo foi o mesmo utilizado pela fabricante da região, 6 polos, o número de polos e a frequência de 60 hertz, o resultado foi expresso em rotações por segundo.

$$n = \frac{120 \cdot 60}{60} = 18 \text{ rp}$$

Rotação específica:

$$n_{esp} = 10^3 \cdot 18 \cdot \frac{6^{0,5}}{188,1^{0,75}} = 868,42$$

Coefficiente de pressão:

$$\varphi = 221,121 \cdot 868,22^{-1,022} = 0,22$$

Diâmetro externo: dado em metros:

$$D_e = \frac{\sqrt{2 \cdot 188,1 / 0,22}}{\pi \cdot 18} = 0,73 \text{ m}$$

Relação de cubo:

$$r = 0,272 + 83,234 \cdot 864,42^{-1} = 0,37$$

Diâmetro interno: dado em metros:

$$D_i = 0,37 \cdot 0,73 = 0,27 \text{ m}$$

Número de pás:

$$n_{pas} = 19,993 - 4,932 \cdot 10^{-2} \cdot 868,42 + 4,650 \cdot 10^{-5} \cdot 868,42^2 - 1,412 \cdot 10^{-8} \cdot 868,42^3 = 3$$

Altura do distribuidor: dado em metros:

$$b_0 = (0,449 - 34,026 \cdot 868,42) \cdot 0,73 = 0,3 \text{ m}$$

Passo interno:

$$p_i = \frac{\pi \cdot 0,27}{3} = 0,28$$

Comprimento da coroa do perfil do diâmetro interno: dado em metros

$$L_i = (1,689 + 2,368 \cdot 10^{-3} \cdot 868,42 - 7,235 \cdot 10^{-6} \cdot 868,42^2 + 4,302 \cdot 10^{-9} \cdot 868,42^3) \cdot 0,28 \\ = 0,3122 \text{ m}$$

Vazão máxima com o rendimento máximo possível do rotor de hélice com distribuidor fixo : arbitrariamente foi estimado com o rendimento com 0,8, resultado dado em metros cúbicos por segundos:

$$Q_{max} = 0,8 \cdot 6 = 4,8 \frac{m^3}{s}$$

Velocidade meridional média: dado em metros por segundo

$$c_m = \frac{4 \cdot 4,8}{\pi \cdot (0,73^2 - 0,27^2)} = 13,37 \frac{m}{s}$$

Velocidade tangencial no diâmetro interno: dado em metros por segundo.

$$u_i = \pi \cdot 18 \cdot 0,27 = 15,27 \frac{m}{s}$$

Componente da velocidade absoluta na direção tangencial no diâmetro interno: dado em m/s, o rendimento neste caso arbitrariamente estipulado de 0,85.

$$0,5 \cdot \Delta c_{uj} = \frac{188,1 \cdot 0,85}{2 \cdot 30,54} = 5,24 \frac{m}{s}$$

Ângulo que a direção do escoamento não perturbado forma com a direção tangencial no diâmetro interno: valor em graus.

$$\beta_{\infty i} = \arctg \frac{13,37}{15,27 - 5,24} = 53,12^\circ$$

Velocidade relativa do escoamento não perturbado no diâmetro interno: dado em metros por segundo.

$$w_{\infty i} = \frac{13,37}{\text{sen}53,12} = \frac{16,71m}{s}$$

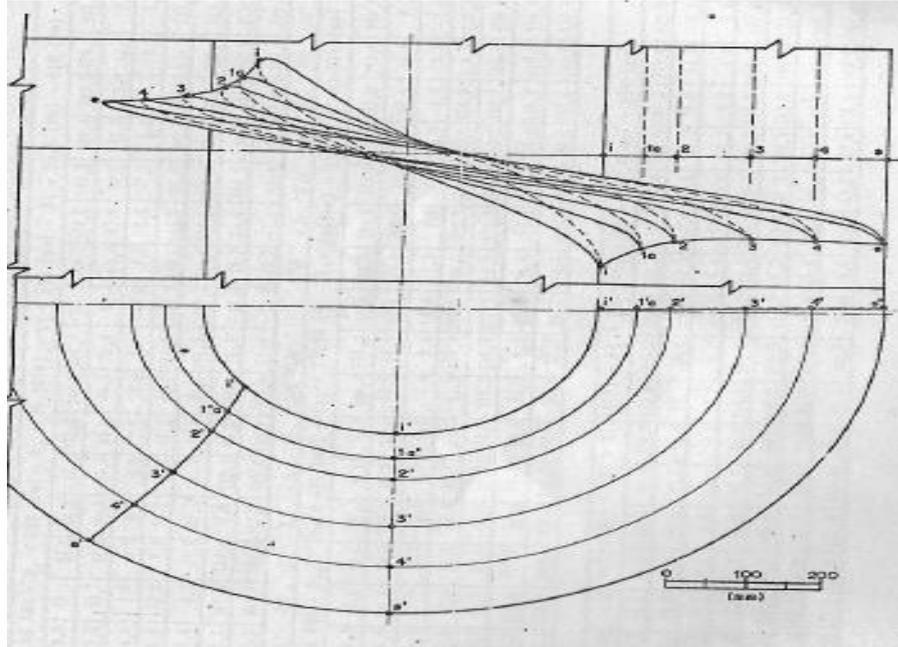
Coeficiente de sustentação de sustentação do perfil no diâmetro interno:

$$C_{si} = \frac{2.1881,1.0,85}{3.18.0,31.16,71} = 0,69$$

A metodologia para dimensionamento de rotores axiais de Sousa (1991) nos fala para comparar o valor do coeficiente de sustentação, se for menor ou igual a 1,20 segue os cálculos, maior que 1,2 a relação de cubo é multiplicada por 1,055 e todos os cálculos refeitos até o momento, se persistir o valor acima de 1,2 o valor será alterado para 1,2 e o perfil de corda interno será recalculado.

A partir deste ponto é estipulado seções na pá para e calculado as interferências do fluxo de ar, Sousa (1991) recomenda a criação de 5 seções e uma média denominada a entra a primeira e segunda seção, onde o diâmetro inicial é justamente o interno e a quinta seção o diâmetro externo.

Figura 8 representação vertical e horizontal com seus perfis de uma pá



Fonte: Sousa (1991)

Diâmetros: em metros

$$D_2 = 0,27 + \frac{0,73 - 0,27}{5} = 0,385m$$

$$D_a = + \frac{0,385 + 0,27}{2} = 0,327m$$

$$D_2 = 0,27 + \frac{0,73 - 0,27}{5} = 0,385m$$

$$D_3 = 0,385 + \frac{0,73 - 0,27}{5} = 0,5m$$

$$D_4 = 0,5 + \frac{0,73 - 0,27}{5} = 0,615m$$

Velocidades tangenciais: em metros por segundo

$$u_a = \pi \cdot 18 \cdot 0,327 = 18,49 \frac{m}{s}$$

$$u_2 = \pi \cdot 18 \cdot 0,385 = 21,77 \frac{m}{s}$$

$$u_3 = \pi \cdot 18.0,5 = 28,27 \frac{m}{s}$$

$$u_4 = \pi \cdot 18.0,615 = 34,78 \frac{m}{s}$$

$$u_5 = \pi \cdot 18.0,73 = 41,28 \frac{m}{s}$$

Componentes da velocidade absoluta na direção tangencial: em metros por segundo

$$0,5 \cdot \Delta c_{ua} = \frac{188,1,0,85}{2.18,49} = 4,32 \frac{m}{s}$$

$$0,5 \cdot \Delta c_{uz} = \frac{188,1,0,85}{2.21,77} = 3,67 \frac{m}{s}$$

$$0,5 \cdot \Delta c_{u3} = \frac{188,1,0,85}{2.28,77} = 2,83 \frac{m}{s}$$

$$0,5 \cdot \Delta c_{u4} = \frac{188,1,0,85}{2.34,78} = 2,3 \frac{m}{s}$$

$$0,5 \cdot \Delta c_{u5} = \frac{188,1,0,85}{2.41,28} = 1,94 \frac{m}{s}$$

Ângulos que a direção do escoamento não perturbado forma com a direção tangencial

$$\beta_{\infty a} = \arctg \frac{13,37}{18,49 - 4,32} = 43,34^\circ$$

$$\beta_{\infty 2} = \arctg \frac{13,37}{21,77 - 3,67} = 36,45^\circ$$

$$\beta_{\infty 3} = \arctg \frac{13,37}{28,27 - 2,83} = 27,37^\circ$$

$$\beta_{\infty 4} = \arctg \frac{13,37}{34,78 - 2,3} = 22,37^\circ$$

$$\beta_{\infty 5} = \arctg \frac{13,37}{41,28 - 1,94} = 18,77^\circ$$

Velocidades relativas do escoamento não perturbado: em metros

$$w_{\infty a} = \frac{13,37}{\text{sen}43,34} = 19,47 \frac{m}{s}$$

$$w_{\infty 2} = \frac{13,37}{\text{sen}36,45} = 22,50 \frac{m}{s}$$

$$w_{\infty 3} = \frac{13,37}{\text{sen}27,72} = 28,78 \text{ m/s}$$

$$w_{\infty 4} = \frac{13,37}{\text{sen}22,37} = 35,13 \frac{m}{s}$$

$$w_{\infty 5} = \frac{13,37}{\text{sen}18,77} = 41,55 \frac{m}{s}$$

Passos sem considerar a espessura das pás.

$$p_a = \frac{\pi \cdot 0,327}{3} = 0,34$$

$$p_2 = \frac{\pi \cdot 0,385}{3} = 0,4$$

$$p_3 = \frac{\pi \cdot 0,5}{3} = 0,52$$

$$p_4 = \frac{\pi \cdot 0,615}{3} = 0,64$$

$$p_5 = \frac{\pi \cdot 0,73}{3} = 0,76$$

Comprimento em verdadeira grandeza da corda dos perfis: em metros

$$L_a = \frac{0,3122 \cdot \cos 53,12 \cdot 0,327}{0,27 \cdot \cos 43,34} = 0,312 \text{ m}$$

$$L_2 = \frac{0,3122 \cdot \cos 53,12 \cdot 0,385}{0,27 \cdot \cos 36,45} = 0,332 \text{ m}$$

$$L_3 = \frac{0,3122 \cdot \cos 53,12 \cdot 0,5}{0,27 \cdot \cos 27,72} = 0,392 \text{ m}$$

$$L_4 = \frac{0,3122 \cdot \cos 53,12 \cdot 0,615}{0,27 \cdot \cos 22,37} = 0,462 \text{ m}$$

$$L_j = \frac{0,3122 \cdot \cos 53,12 \cdot 0,73}{0,27 \cdot \cos 18,77} = 0,535 \text{ m}$$

Força que atua no diâmetro médio 0.3.z: em quilograma força

$$F = 325 \cdot 10 \cdot (0,3122 - 0,535) \cdot (0,73 - 0,27) = 1266,56 \text{ kgf}$$

Momento Fletor: resultado em quilograma força metro

$$M_f = 1266,56 \cdot \frac{(0,73 - 0,27)}{4} = 145,65 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Espessura no centro de gravidade do perfil do diâmetro interno: em metros

$$E_{gi} = 1,139 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{145,65}{0,3122}} = 0,025 \text{ m}$$

Espessura no centro de gravidade do perfil do diâmetro externo: em metros

$$E_{ge} = 0,33 \cdot 0,025 = 8,12 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Coefficiente de engrossamento ou afinamento para diâmetro interno

$$f_i = \frac{0,025 \cdot 0,122}{0,3122} = 0,715$$

Espessura no centro de gravidade nos demais diâmetros: em metros

$$E_{ga} = \frac{0,025 \cdot 0,73 - 8,12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,27(0,025 - 8,12 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,327}{0,73 - 0,27} = 0,022 \text{ m}$$

$$E_{g2} = \frac{0,025 \cdot 0,73 - 8,12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,27(0,025 - 8,12 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,385}{0,73 - 0,27} = 0,02 \text{ m}$$

$$E_{g3} = \frac{0,025 \cdot 0,73 - 8,12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,27(0,025 - 8,12 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,5}{0,73 - 0,27} = 0,016 \text{ m}$$

$$E_{g4} = \frac{0,025 \cdot 0,73 - 8,12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,27(0,025 - 8,12 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,615}{0,73 - 0,27} = 0,012 \text{ m}$$

Ordenada no centro de gravidade do perfil interno: dado em metros.

$$y_{gi} = 0,5 \cdot 0,025 + 0,014 \cdot 0,715 \cdot 0,3122 = 0,0156 \text{ m}$$

Coefficiente de afinamento ou engrossamento do diâmetro externo

$$f_e = \frac{8,12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,08}{0,535} = 0,19$$

Ordenada superior do perfil em seu centro de gravidade do perfil externo: dado em metros

$$y_e = 0,5.8,12.10^{-3} + 0,0038.0,19.0,535 = 4,45.10^{-3} m$$

Ordenada no centro de gravidade nos demais perfis: dados em metros

$$y_{g1} = \frac{0,0156.0,73 - 4,45.10^{-3} - .0,27 - (0,0156 - 4,45.10^{-3}).0,327}{0,73 - 0,27} = 0,015 m$$

$$y_{g2} = \frac{0,0156.0,73 - 4,45.10^{-3} - .0,27 - (0,0156 - 4,45.10^{-3}).0,385}{0,73 - 0,27} = 0,014 m$$

$$y_{g3} = \frac{0,0156.0,73 - 4,45.10^{-3} - .0,27 - (0,0156 - 4,45.10^{-3}).0,5}{0,73 - 0,27} = 0,0115 m$$

$$y_{g4} = \frac{0,0156.0,73 - 4,45.10^{-3} - .0,27 - (0,0156 - 4,45.10^{-3}).0,615}{0,73 - 0,27} = 8,24.10^{-3} m$$

Ordenadas máximas dos perfis, interno, externo e os demais: dados em metros

$$y_{maxi} = 1,02.0,025 + 0,011.0,715.0,3122 = 0,028 m$$

$$y_{maxe} = 1,02.8,12 + 0,008.0,19.0,535 = 0,016 m$$

$$y_{g1} = \frac{0,028.0,73 - 0,016.0,27 - (0,028 - 0,016).0,327}{0,73 - 0,27} = 0,025 m$$

$$y_{g2} = \frac{0,028.0,73 - 0,016.0,27 - (0,028 - 0,016).0,385}{0,73 - 0,27} = 0,024 m$$

$$y_{g3} = \frac{0,028.0,73 - 0,016.0,27 - (0,028 - 0,016).0,5}{0,73 - 0,27} = 0,021 m$$

$$y_{g4} = \frac{0,028.0,73 - 0,016.0,27 - (0,028 - 0,016).0,615}{0,73 - 0,27} = 0,018 m$$

Ângulos de escorregamento:

$$\lambda_1 = \text{arc tg} \left[ 0,012 + 0,06 \cdot \left( \frac{0,028}{0,322} \right) \right] = 0,99^\circ$$

$$\lambda_a = \text{arc tg} \left[ 0,012 + 0,06 \cdot \left( \frac{0,025}{0,3124} \right) \right] = 0,96^\circ$$

$$\lambda_2 = \text{arc tg} \left[ 0,012 + 0,06 \cdot \left( \frac{0,024}{0,332} \right) \right] = 0,93^\circ$$

$$\lambda_3 = \text{arc tg} \left[ 0,012 + 0,06 \cdot \left( \frac{0,021}{0,392} \right) \right] = 0,87^\circ$$

$$\lambda_4 = \text{arc tg} \left[ 0,012 + 0,06 \cdot \left( \frac{0,018}{0,462} \right) \right] = 0,82^\circ$$

$$\lambda_5 = \text{arc tg} \left[ 0,012 + 0,06 \cdot \left( \frac{0,016}{0,535} \right) \right] = 0,79^\circ$$

Coefficientes de sustentação considerando o arrasto

$$C_{s1} = \frac{2.188,1.0,85}{3.18} \cdot \left( \frac{\text{sen } 53,12}{0,3122.16,7 \cdot \text{sen}(52,13 - 0,99)} \right) = 1,15$$

$$C_{sa} = \frac{2.188,1.0,85}{3.18} \cdot \left( \frac{\text{sen } 43,34}{0,312.19,47 \cdot \text{sen}(43,34 - 0,96)} \right) = 0,99$$

$$C_{s2} = \frac{2.188,1.0,85}{3.18} \cdot \left( \frac{\text{sen } 36,425}{0,3122.16,7 \cdot \text{sen}(36,45 - 0,93)} \right) = 0,81$$

$$C_{s3} = \frac{2.188,1.0,85}{3.18} \cdot \left( \frac{\text{sen } 27,72}{0,3122.16,7 \cdot \text{sen}(27,72 - 0,87)} \right) = 0,54$$

$$C_{s4} = \frac{2.188,1.0,85}{3.18} \cdot \left( \frac{\text{sen } 22,37}{0,3122.16,7 \cdot \text{sen}(22,37 - 0,82)} \right) = 0,375$$

$$C_{s5} = \frac{2.188,10,85}{3.18} \cdot \left( \frac{\text{sen } 18,77}{0,3122.16,7 \cdot \text{sen}(18,77 - 0,79)} \right) = 0,28$$

Razão do coeficiente de sustentação que considera o arrasto e a influência de uma pá sobre a outra e o que considera somente o arrasto

$$\left( \frac{C'_s}{C_s} \right)_1 = 1 + (1,34 - 0,9) \cdot [tg(55,131 - 0,29.53,12 - 0,0881. 53,12^2 + 0,00122. 53,12^3)] = 0,785$$

$$\left( \frac{C'_s}{C_s} \right)_a = 1 + (1,34 - 1,09) \cdot [tg(55,131 - 0,29.43,34 - 0,0881. 43,34^2 + 0,00122. 43,34^3)] = 0,89$$

$$\left( \frac{C'_s}{C_s} \right)_2 = 1 + (1,34 - 1,2) \cdot [tg(55,131 - 0,29.36,45 - 0,0881. 36,45^2 + 0,00122. 36,45^3)] = 0,97$$

$$\left( \frac{C'_s}{C_s} \right)_3 = 1 + (1,34 - 1,33) \cdot [tg(55,131 - 0,29.27,72 - 0,0881. 27,72^2 + 0,00122. 27,72^3)] = 1$$

$$\left( \frac{C'_s}{C_s} \right)_4 = 1 + (1,34 - 1,38) \cdot [tg(55,131 - 0,29.22,37 - 0,0881. 22,37^2 + 0,00122. 22,37^3)] = 0,99$$

$$\left( \frac{C'_s}{C_s} \right)_5 = 1 + (1,34 - 1,42) \cdot [tg(55,131 - 0,29.18,77 - 0,0881. 18,77^2 + 0,00122. 18,77^3)] = 0,9$$

Coeficiente de sustentação considerando o arrasto e a influência de uma pá sobre a outra

$$C'_{s1} = 0,785 \cdot 1,15 = 0,897$$

$$C'_{sa} = 0,89 \cdot 0,99 = 0,88$$

$$C'_{s2} = 0,97 \cdot 0,81 = 0,7857$$

$$C'_{s3} = 0,54 \cdot 1 = 0,54$$

$$C'_{s4} = 0,375 \cdot 0,99 = 0,37$$

$$C'_{s5} = 0,28 \cdot 0,96 = 0,27$$

Ângulos de ataque.

$$\delta_1 = 10,8696 \cdot [0,897 - (4,8.0,09)] = 5,05^\circ$$

$$\delta_a = 10,8696 \cdot [0,88 - (4,8.0,08)] = 5,39^\circ$$

$$\delta_2 = 10,8696 \cdot [0,7857 - (4,8.0,07)] = 4,89^\circ$$

$$\delta_3 = 10,8696 \cdot [0,54 - (4,8.0,054)] = 3,05^\circ$$

$$\delta_4 = 10,8696 \cdot [0,897 - (4,8.0,039)] = 1,99^\circ$$

$$\delta_5 = 10,8696 \cdot [0,897 - (4,8.0,03)] = 1,37^\circ$$

Ângulos que a reta paralela ao eixo x passa no centro de gravidade do perfil

$$\beta_1 = (53,12 - 5,05) = 48,06^\circ$$

$$\beta_a = (43,31 - 5,39) = 37,95^\circ$$

$$\beta_2 = (36,45 - 4,89) = 31,56^\circ$$

$$\beta_3 = (27,72 - 3,05) = 24,67^\circ$$

$$\beta_4 = (22,37 - 1,99) = 20,38^\circ$$

$$\beta_5 = (53,12 - 5,05) = 17,4^\circ$$

$$\beta_{m1} = 0,5 \cdot (53,12 + 48,06) = 50,59^\circ$$

$$\beta_{ma} = 0,5 \cdot (43,31 + 37,95) = 40,64^\circ$$

$$\beta_{m2} = 0,5 \cdot (36,45 + 31,56) = 34,005^\circ$$

$$\beta_{m3} = 0,5 \cdot (27,7 + 24,67) = 26,195^\circ$$

$$\beta_{m4} = 0,5 \cdot (20,38 + 22,37) = 21,375^\circ$$

$$\beta_{m5} = 0,5 \cdot (18,77 + 17,4) = 18,085^\circ$$

No roteiro proposto por Sousa (1991) os novos ângulos  $\beta_m$  devem substituir os ângulos  $\beta_\infty$  desde os ângulos de escorregamento até no cálculo  $\beta$  e comparar os resultados novos com o primeiro calculado, caso a diferença esteja entorno de 1%, assume os novos valores como corretos, caso esteja acima o procedimento continua, até que a diferença de 1% seja alcançada. Para este dimensionamento, foi realizado o processo de calcular até a comparação entre os dois ângulos, entretanto, a diferença foi irrisória, portanto, não há necessidade de demonstração destes cálculos.

Ângulos do escoamento não perturbado na entrada no rotor

$$\alpha_{\infty 1} = \text{arc tg } \frac{13,37}{5,24} = 68,60^\circ$$

$$\alpha_{\infty a} = \text{arc tg } \frac{13,37}{4,32} = 72,09^\circ$$

$$\alpha_{\infty 2} = \text{arc tg } \frac{13,37}{3,67} = 74,68^\circ$$

$$\alpha_{\infty 3} = \text{arc tg } \frac{13,37}{2,83} = 78,049^\circ$$

$$\alpha_{\infty 4} = \text{arc tg } \frac{13,37}{2,3} = 80,24^\circ$$

$$\alpha_{\infty 5} = \text{arc tg } \frac{13,37}{1,94} = 81,71^\circ$$

Rendimento dos perfis não considerando as perdas junto aos diâmetros interno e externo

$$n_{r1} = 1 - \left( \frac{16,71 \cdot \text{tg } 0,99}{15,57 \cdot \text{sen}(52,13)} \right) = 0,98$$

$$n_{ra} = 1 - \left( \frac{19,47 \cdot \text{tg } 0,96}{18,49 \cdot \text{sen}(42,38)} \right) = 0,97$$

$$n_{r2} = 1 - \left( \frac{22,50 \cdot \text{tg } 0,93}{21,77 \cdot \text{sen}(35,52)} \right) = 0,97$$

$$n_{r3} = 1 - \left( \frac{28,78 \cdot \text{tg } 0,87}{28,27 \cdot \text{sen}(26,85)} \right) = 0,96$$

$$n_{r4} = 1 - \left( \frac{35,13 \cdot \text{tg } 0,82}{34,78 \cdot \text{sen}(21,55)} \right) = 0,96$$

$$n_{r5} = 1 - \left( \frac{41,55 \cdot \text{tg } 0,79}{41,28 \cdot \text{sen}(17,98)} \right) = 0,95$$

Usando as Metodologia de Souza (1991) isto definimos como perfis o GO 480 para todas as seções.

#### 4.2.3 Propostas de melhorias

Além do dimensionamento correto, tanto dos ventiladores como das janelas, vendo a necessidade de controle do fluxo para uma maior homogeneidade no tempo de secagem das

pilhas de madeira, a instalação de ventiladores auxiliares, apenas para controlar o direcionamento do fluxo do ar dentro da estufa traria uma melhor qualidade no processo em si.

A ideia parte da alocação nas paredes laterais da estufa, a implicância maior seria no aumento de gasto com os mesmos, o que depois da instalação e testado, fazendo uma análise de custo benefício para ver sua aplicabilidade.

O design do secador também poderia ser mudado, ao invés do equipamento de aquecimento ficar na parte superior estes poderiam ficar lateralmente na estrutura dos secadores, com os devidos cálculos, é possível arrumar as baterias dos trocadores de calor de maneira ascendente, onde comece da parte inferior até a superior da estufa, neste caso, ainda pode se cogitar no uso de ventiladores auxiliares, na parte superior do secador, controlando assim a velocidade e fluxo de ar.

Espaçamento uniformes nas pilhas podem ajudar na diminuição de perdas de energia, e ainda uniformizar o processo, diminuindo assim empenamentos.

Sobre métodos de rendimento da ventilação o uso de inversores de frequência pode ser uma forma de automatizar o processo e reduzir custos, apesar de ser um equipamento relativamente caro, em alguns anos os mesmos se auto-pagam.

Klitzke (2002) realizou uma pesquisa referente ao uso de inversores de frequência para o controle da velocidade dos ventiladores a cada fase das curvas de secagem, com velocidades entre 2m/s a 4 m/s, este se baseou em uma análise de custo benefício entre o valor de investimento e economia no processo vendo que a implementação de inversores em questão de economia se pagariam em torno de 3 anos, nestas faixas de velocidade houve uma pequena redução das taxas de secagem (aproximadamente 13%), e uma economia na casa dos 30%, o mesmo ainda ressalta a melhor qualidade e que a redução de gasto de energia está intrinsecamente ligadas ao controle da velocidade nas fases finais de secagem.

Müller (2007) usou duas estufas para aquisição de dados, constatando uma significativa redução de custos na energia elétrica com o uso do inversor de frequência e com estagnação nos outros parâmetros referentes ao tempo e qualidade do processo, quando comparado com o não uso de inversor.

Com o controle da rotação dos motores consegue-se evitar picos de energia e consequentemente a redução de problemas enquanto ao funcionamento, conseguindo desta maneira a redução de futuras manutenções corretivas, o maior problema com os inversores seria o alto investimento, contudo em empresas que necessitam do uso contínuo de secadores e com planos de secagens padronizados o equipamento se pagaria em economia depois de alguns anos.

Os inversores possuem como grande problema, seu alto preço de aquisição, devido a isto, são recomendados, em empresas que apenas utilizem, secagem por secadores, ou que os utilizem continuamente os mesmos.

#### 4.2.4 Umidificação

Apesar de possuírem tremenda importância nas estufas de madeiras nobres, na secagem de *Pinus* o sistema de umidificação se torna desnecessário, uma vez que foi relatado por todas as madeiras que não o utilizam devido a não necessidade de grande qualidade final do produto, admitindo problemas como micro-rachaduras, entretanto, todos ressaltaram que para madeiras como Eucalipto os sistemas de umidificação são de extrema necessidade, devido a grande dificuldade de secagem do mesmo.

#### 4.2.5 Sistemas de aquecimento

Basicamente podem ser definidos como o conjunto dos elementos necessários para a realização da troca térmica, caldeira e trocadores de calor e fluido térmico.

Os trocadores de calor são o conjunto responsável de transferir energia para o ar adquirido dos *dampers*, com isso, diminui a umidade dos mesmos aumentando sua capacidade de secagem tanto pelos processos de condução como de convecção.

Existem diversas configurações de trocadores de calor, cada um com suas vantagens e desvantagens, entretanto, para fluidos gasosos é recomendável o uso de trocadores compactos do tipo tubo aletado, devido a necessidade do aumento da capacidade de troca convectiva e as altas pressões que estes podem ser submetidos, mesmo não possuindo a mesma capacidade convectiva dos compactos de tipo placa, por estes possuírem eventuais problemas com incrustações.

Assim como a ventilação o conjunto de radiadores de calor devem ser dispostos em toda área de circulação do ar, já que este deve perder sua umidade para passar entre as pilhas de madeira.

Em campo, foi encontrado trocadores de tipo aletado dispostos conjunto de radiadores em frente aos ventiladores cobrindo toda a região de passagem de ar, sobre manutenção foi relatado o uso de limpezas periódicas.

Um projeto de engenharia é essencial para o bom funcionamento dos mesmos, visto que o sub-dimensionamento pode acarretar em prejuízos na secagem além do próprio risco de segurança, os trocadores de calor devem ser dimensionados de maneira que acompanhem as

necessidades da curva de secagem, conseguindo transferir a energia necessária para a melhor ocorrência do processo.

Almeida (2011) relatou em sua pesquisa a existência de um grande descaso diante do conjunto de todo o conjunto necessário para o processo de transferência energética para as pilhas de madeira, desde os trocadores de calor até os equipamentos de ventilação, ocasionando em perdas de rendimento e perigo de segurança.

Dentre as melhorias neste sistema, a criação de sistema de regeneração de energia usando o vapor das caldeiras para geração de energia pode trazer economia no consumo de energia elétrica do secador

#### 4.3 Curvas de secagem

As curvas de secagem usadas pelas empresas de desdobramento de madeira na região, são do tipo convencional, e ainda muitas seguindo os programas de secagem estabelecidos pela empresa de automação.

Em média levam 72 horas até o término da secagem chegando em um índice de umidade de 16%, o qual é necessário para a comercialização.

Quadro 7 Programa de Secagem para *Pinus Taeda/ Ellioti* com 11mm de espessura

Fase	Temperatura de bulbo seco	Temperatura de bulbo seco	Tempo em horas	Umidade
1	65	65	8	-
2	60	55	5	-
3	60	50	10	-
4	65	52	8	-
5	65	49	8	-
6	68	49	8	-
7	72	48	1	23
8	74	45	-	23-12

Fonte: O Autor (2018).

Quadro 8 Programa de Secagem para *Pinus Taeda/Elliotti* com 15mm de espessura

Fase	Temperatura de bulbo seco	Temperatura de bulbo úmido	Tempo em horas	Umidade
1	70	68	8	-
2	70	64	3	-
3	70	64	3	-
4	70	63	3	-
5	70	62	3	-
6	70	61	3	-
7	72	60	3	-
8	74	59	3	-
9	75	58	3	-
10	75	58	3	-
11	75	57	3	-
12	75	56	3	-
13	80	56	3	-
14	80	56	3	-
15	80	54	3	< 24
16	80	53	3	<18
17	82	52	3	<15
18	85	48	3	<12

Fonte: O Autor (2018).

Os quadros acima possuem dados de curvas de secagem coletados de duas empresas da região, cada uma foi dimensionada por métodos empíricos de acordo com o conhecimento dos operadores, Galvão e Jankowsky (1985) desenvolveram um plano de secagem para *Pinus sp*, demorando aproximadamente 72 horas.

Quadro 9 Curva de secagem para *Pinus spp* com 25 mm de espessura

Umidade da madeira	Temperatura de bulbo seco	Temperatura de Bulbo úmido	Diferença higrométrica	Umidade relativa	Umidade de equilíbrio
Aquecimento	60	59	1	95	20,6
Acima de 60%	60	55,5	4,5	80	13,1
50%	60	54,5	5,5	75	12
40%	60	52	8	65	9,8
30	65	53	12	55	7,7
20	75	57,5	17,5	40	5,5
Uniformização	75	69	6	75	11
Condicionamento	75	73	2	92	16

Fonte: Galvão e Jankowsky (1985)

Quadro 10 Programa de secagem para *Pinus Taeda* 36 mm de espessura

Fase	Umidade da madeira	Temperatura de bulbo seco	Temperatura de bulbo úmido	Umidade Relativa	Umidade de equilíbrio
Aquecimento	5 horas	70	70	100	22
1	Verde-50	90	82	72	9
2	50-40	90	80	67	7,9
3	40-35	90	77	59	6,7
4	35-30	90	75	54	6,0
5	30-25	90	73	49	5,5
6	25-20	90	71	45	5
7	20-15	90	69	41	4,5
8	15-10	90	68	39	4,4
Condicionamento	6 HORAS	90	84	74	10,5

Fonte: adaptado, Klitzke (2002)

Kiene(1997), Santini (1996) e Galvão e Jankowsky (1985) citam que a secagem em coníferas podem ser em altas temperaturas ou em aumento de temperaturas, com taxas de secagem altas.

Santini e Haselein (2002) utilizaram um plano de secagem de altas temperaturas para estimativas da influência da velocidade do ar e temperatura nas taxas de secagem, entretanto não existe nenhuma referência enquanto a qualidade da madeira após o processo.

Quadro 11 Programa de secagem a altas temperaturas para *Pinus Elliotti* 12,5 mm de espessura

Umidade da madeira	Temperatura de Bulbo seco	Temperatura de bulbo úmido	Umidade de equilíbrio
>70	110	99,4	7
70-50	110	97,7	6,3
50-40	110	94,4	5,4
40-30	110	87,8	4,0
30-20	110	82,2	3,3
20-15	110	76,7	2,6
15-10	110	71,1	2,1

Fonte: Santini e Haselein (2002)

O quadro acima demonstra o programa de secagem usado por Santini e Haselein (2002) é visto que apesar da estabilidade de 110°C de TBS o TBU o acompanha da mesma forma, Tomaseli (1982) em sua pesquisa relata que o uso de altas temperaturas pode ser efetuado de duas maneiras: a temperatura de 100°C ou mais de TBS e o termômetro de bulbo úmido é

mantido a 100°C apenas com vapor-superaquecido e a outra forma seria com a temperatura de bulbo úmido próxima aos 100°C e o TBS à 100°C ou mais.

No programa de secagem elaborado por Santini e Haselein (2002) a velocidade do ar foi de 5 m/s contrapondo a velocidade recomendada para planos de secagem de convencional de 2,5 à 3 m/s no decorrer da secagem, os mesmos e Klitzke (2002) constataram que a influência do ar nas fases finais da secagem é mínima

Koech (1973) demonstra em sua pesquisa que as mudanças nas propriedades mecânicas e físicas do *Pinus* é pequena sendo possível a aplicação do método de altas temperaturas com os devidos cuidados.

Tomaseli (1982) explica que para uso da secagem em altas temperaturas é necessário a estufa possuir alguns pré-requisitos para o devido funcionamento e segurança do processo, como ventiladores bem dimensionados eficientes com uso de defletores de ar, para empilhamento é recomendado sarrafos de 25 mm de espessura colocados em intervalos de 50 cm, com carga de restrição de 1000 kg/m<sup>2</sup>, o aquecimento o maior cuidado deve ser no uso das caldeiras devido a necessidade de maior energia térmica, pinturas podem diminuir a corrosão.

Cada modelo de programa de secagem deve atender da melhor maneira possível as necessidades de tempo e qualidade que a madeira requer, o que se torna complexo a padronização do mesmo, mas o estudo do comportamento da madeira e de curvas de secagens já existentes ajudam no desenvolvimento de novos programas de secagem que visem a eficiência, não só economicamente falando como também em questões de qualidade.

O uso de curvas de secagem de altas temperaturas mostra-se um meio promissor de ganhar eficiência no processo, porém, no Brasil, a pesquisa sobre seu uso é escassa sem dados sobre a qualidade do produto final o qual demonstra a necessidade de ser desenvolvida para a aplicação na indústria de forma correta para o ajuste dos secadores convencionais, já que em questão de tempo a um decréscimo de mais de 50% nos testes realizados sobre a mesma, no exterior o desenvolvimento científico em questão da secagem em altas temperaturas está mais desenvolvido, com relatos de viabilidade em sua aplicação e de baixos índices de defeitos na estrutura da madeira de *Pinus*, sendo assim é visto que a problemática maior deste tipo de curva de secagem são seus testes em modelos de estufas no cenário industrial brasileiro, mas com os devidos cuidados e testes demonstra ser uma forma eficaz de aprimorar o processo.

Os métodos convencionais de secagem na indústria baseiam-se por tempo-temperatura e não utilizando a umidade no início do processo, fato até compreensível devido a pouca ou nenhuma confiabilidade dos medidores elétricos no início da secagem.

#### 4.4 Controle

Na coleta de informações, as empresas fabricantes relataram que a parte de automatização do processo é feita por terceiros, em pesquisa foi observado o uso do mesmo sistema de controle, quase todos fornecidos pela mesma empresa, este tem como princípio o uso de sensores de umidade, de velocidade e de temperatura de bulbo úmido e seco respectivamente, devido há não existência de preocupação com a velocidade dos ventiladores, o controle se limita apenas nas temperaturas de bulbo úmido e seco, por meio destas é emitido sinais elétricos para todo o conjunto requerendo mais ou menos energia, e abertura dos *dampers*, sendo caracterizado pelo uso de um controle proporcional.

As curvas de secagem são dadas pela própria empresa de automação, mas podendo ser alteradas a medida da necessidade, a interface para programação das mesmas é simples e de fácil uso, possuindo as lacunas e tempo para cada fase, além da demonstração de como está ocorrendo o processo na câmara de secagem, mostrando a velocidade do ar a umidade das pilhas e a abertura dos *dampers*.

Melo (2005) realizou um trabalho de pesquisa no âmbito de desenvolver método de controle eficaz para a secagem, utilizando equações de Laplace para a modelagem do sistema, aplicando um sistema puramente proporcional, ou seja apenas com ganhos ou perdas controladas, conseguindo um rendimento no uso da energia em 13% e mudando os paradigmas do processo na madeira a qual forneceu a estufa para estudo, já que além da economia de energia, também foi conseguido atingir o objetivo principal de diminuir a necessidade de retrabalhos.

Santini (1996) estudou os métodos de controle e monitoramento, com ênfase no método TDAL, o qual se baseia na análise da temperatura da madeira, é um método relativamente novo quando comparado as outras formas de averiguação da umidade da madeira, a ideia principal do método é a medição da diferença da temperatura no decorrer da secagem, em seus comparativos entre o método convencional, com uso de medidores elétricos, observou-se que os medidores elétricos possuem uma estimava que de fato possa ser levada em conta na faixa de 30% à 6% com uma correlação muito alta, em níveis mais altos de umidade foi notada quase nenhuma correlação, já a temperatura da madeira para a estimativa da umidade mostra-se eficaz em sistemas de alta temperatura atingindo bons níveis de correlação e ainda que a maior exatidão na medição de umidade ainda se encontra na pesagem determinação por pesagem.

Henn (2017) elaborou um protótipo de estufa com controle usando CLP, sensores central de dados, sua forma de funcionamento é similar com a de Melo (2005) e Santini (1996), é captado os dados de bulbo úmido e seco além da umidade da madeira por sensores, é feita a leitura e de acordo com o ajuste de variáveis de curva de secagem o sistema aciona abertura de *dampers* ou aquecimento dos secadores até atingir valores próximos de temperaturas desejado.

Não se foi relatado ou observado problemas no programa de controle, entretanto o uso de sensores pode não ser confiável na verificação da umidade da madeira acima de 30%, a TDAL é um método novo para aferição de umidade que possui várias variáveis a serem estudadas, sendo assim em um futuro próximo com desenvolvimento de novas pesquisas sobre o comportamento da temperatura da madeira nas fases da secagem pode ser interessante a integração dos dois métodos de medição para diminuir o erro, o método de pesagem é descrito por todos os autores pesquisados como o mais confiável para aferição da umidade, mas se tratando de produção se torna inviável sua utilização, já que seria necessário a abertura da câmara de secagem para medições periódicas de amostras de controle.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível a análise dos aspectos gerais da secagem na região da serra catarinense, conseguindo demonstrar como o processo é realizado tanto no âmbito ao ar livre quanto com o uso de estufas, conseguindo através desta análise notar a necessidade de aprimoramento de alguns pontos no processo e nos secadores.

Na secagem ao ar livre foi notado uma grande dispersão do índice de umidade das peças de madeira, além da demora para atingir níveis aceitáveis para a comercialização das mesmas, em experimento a pilha de madeira demorou 29 dias para atingir 24% de umidade, mas em campo foi relatado que a técnica de varal é um meio de aumentar a velocidade de secagem, no inverno, há relatos de demorar mais de 50 dias, mostrando com isso a necessidade do uso de secadores de madeira para atender a necessidade de demanda de produção.

Nos secadores, as melhorias poderiam ocorrer no uso de ventiladores nas paredes laterais para auxiliar no fluxo de ar dentro da estufa, ainda, o design dos mesmos poderia ser remodelado, uma vez que o principal problema citado pelas empresas é a diferença da taxa de secagem entre as pilhas superiores e inferiores, o qual deve ocorrer devido a peculiaridade do ar se mover das regiões mais frias para as mais quentes, com isto em mente, a disposição dos trocadores de calor juntamente com o conjunto de ventiladores poderiam ser feitas nas laterais da estrutura do secador, uniformizando assim tanto o calor quanto a temperatura dentro da câmara de secagem. A aplicação de inversores de frequência em madeiras que utilizem a secagem por estufa de maneira contínua pode trazer a longo prazo uma redução dos custos.

A criação de um sistema para uso do vapor na geração de energia elétrica a qual poderia ser reutilizada na própria estufa, poderia diminuir consideravelmente os custos de funcionamento da estufa.

Sobre os elementos estrutura isolamento térmica de alvenaria, de lã de rocha ou de fibra de vidro, em teoria possuem as mesmas características, mas as estruturas de alvenaria possuem o agravante da construção não ser padronizada, com isto pode possuir índices maiores ou menores de isolamento dependendo de como foi sua construção e materiais utilizados, os cuidados com esta também devem ser maiores, devido as propriedades do material e de estar e pleno contato com a umidade e diferenciais de temperatura, o uso de tintas pode ajudar no fator de impermeabilidade, segundo Simpson (1991) é necessário a manutenção estrutural no mínimo a cada 5 anos.

Ainda foi possível realizar o dimensionamento do ventilador axial do secador, calculando o número de pás potência do ventilador e ângulos do fluxo de ar sobre as pás, além dos perfis da mesma e rendimento chegando na casa dos 96%, e seu tamanho de 73 centímetros, conseguindo assim exemplificar o processo de dimensionamento, já que cada estufa é necessário a análise de sua estrutura e perdas, neste dimensionamento foi feito em função do trabalho específico de 188,1 kJ/jg, o qual também foi calculado através da equação da energia para fluidos compressíveis.

Para pesquisas futuras recomenda-se o desenvolvimento do sistema de geração de energia com o vapor provindo das caldeiras, o estudo aprofundado de programas de secagem em alta temperatura, visto que estes podem trazer um aumento de produtividade de até 50%, ainda pode ser realizado uma pesquisa para criação de curvas de secagem estudo do dimensionamento do secador para utilização de programas de secagem embasados no uso de altas velocidades do ar no início da secagem e temperaturas suaves e temperaturas altas com baixas velocidades do ar no final do processo, além da análise destes, já que como relatado, a velocidade do ar é o maior influenciador nas primeiras fases da secagem, mas com pouca significância no final do processo.

## REFERÊNCIAS

A-HADHRAMI, L.M., AHMAD, A., “**Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia**”, *Applied Thermal Engineering Journal*, v.29, pp.1123-1130, 2009.

ALMEIDA, B. C. **Contribuição para melhoria do processo de secagem convencional de madeiras serradas na região norte do estado de Mato Grosso**. Dissertação (mestrado) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

ANDRADE, A. **Indicação de programas para a secagem convencional de madeiras**. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

BRANDÃO, V. **Desenvolvimento SC: uma visão da indústria**. Florianópolis: FIESC, 2010.

BRAN, R; SOUZA.Z. **Máquinas de fluxo: turbinas, bombas, ventiladores**. 2ed. Rio de Janeiro, 1969.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos: 2ª ed**. São Paulo: Pearson, 2008.

ÇENGEL, Y. A; CIMBALA, J. M. Porto Alegre: AMGH, 2007.

CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada**. dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

FOUST, A.S; *Et.al.* **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

FOX, R. W; *Et.al.* **Introdução à mecânica dos fluidos: 7ª ed**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GALINA, I.C.M; JANKOWSKY, I.P. **Secagem de madeiras**. São Paulo: EMBRAPA, 2013.

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

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JANNA, W. S. **Projeto de sistemas fluido térmicos**. 4ed. São Paulo: 2016.

JANKOWSKY, I. P. **Equipamentos e processos para a secagem de madeiras**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. Anais... Piracicaba: IPEF, 1995.

HENN, M.C. **Estufa automática para secagem de madeira**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2017.

JANKOWSKY, I. P. **Melhorando a eficiência dos secadores para madeira serrada**. Piracicaba: IPF, Departamento de ciências florestais, ESALQ/USP, 2000.

JANKOWSKY, I. P; *Et.al.* **Secagem da madeira de eucalipto**. In: XV JORNADAS FLORESTAIS DE ENTRE RIOS, Santa Catarina, Concordia, 2000.

JANKOWSKY, I.P. **Fundamentos de secagem de madeiras**. Piracicaba: Documentos florestais, 1990.

KIENE, S. **Avaliação do processo de secagem de madeira em estufa com banho de vapor**. Dissertação (mestrado) – Universidade federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

KLITZKE, R. J. **Uso do inversor de frequência na secagem de madeira**. Tese (doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

KOECH. P. **High temperature kilning of Southern pine poles, timbres, lumber and thick venner**. I.U.F.R.O. Meeting Proceedings, v.2: 568-611, 1973

MACHADO, H. C. **A exploração madeireira no planalto catarinense: da araucária à diversificação produtiva da madeira**. In: 2º SEMINÁRIO NACIONAL DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO PLANEJAMENTO TERRITORIAL, GEOGRAFIA ECONÔMICA. Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis 2014.

MARQUES. A; *ET.AL.* **Isolamento térmico e acústico**. Universidade Fernando Pessoa. 2010.

MARTINS, V. A. **Secagem de madeira serrada**. Brasília: Gutenberg, 1988.

MELO, R.C. **Controle e instrumentação de sistemas de secagem de madeira na indústria moveleira**. Dissertação (mestrado) – Universidade federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>>. Acesso em: 10.nov.2018.

MORAN, M. J; *Et.al.* **Princípios de termodinâmica para engenharia: 7ª ed.** Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MORESCHI, J.C. **Propriedades da madeira.2ªedição**; Curitiba, Departamento de engenharia e tecnologia florestal da UFPR, 2012.

MORESCHI, J.C. **Relação água-madeira e sua secagem.2ªedição**; Curitiba, Departamento de engenharia e tecnologia florestal da UFPR, 2014.

MÜLLER, T. S. **Redução do consumo de energia elétrica no processo de secagem de pinus taeda**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MUNSON, B. R; *Et.al.* **Fundamentos da mecânica dos fluidos: 4ª ed.** São Paulo: Blucher, 2004.

RIGÃO.A.O. **Comportamento de pequenas paredes de alvenaria estrutural frente a altas temperaturas**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SANTINI, E. J. **Alternativas para monitoramento e controle do processo de secagem de madeira serrada em estufa**. Tese (doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

SANTINI, E. J. **Secagem de madeira serrada em estufa solar e sua comparação com métodos convencionais**. Dissertação (mestrado) - Setor de Ciências Agrárias, UniversidadeFederal do Paraná, Curitiba, 1981.

SANTINI.E.J; HASELEIN.C.J.**Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de Pinus elliotti.** Ciência Florestal, Santa Maria, 2002.

SANTOS, G. R.V. **Otimização da secagem da madeira de eucalyptus.** Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual.** Madison: USDA Forest Service, 1991 (USDA Agricultural Handbook 188).

SIMPSON, W.T. **Equilibrium moisture content prediction for wood.** Madison, v. 21, n 5, May. 1971.

SOUZA.Z. **Dimensionamento Máquinas de fluxo: turbinas, bombas, ventiladores.** editora BÜCHER. São Paulo, 1991.

TOMASELLI.I. **Secagem a alta temperatura e sua aplicação nas condições brasileiras.** Revista Floresta, Paraná, 1982.

WENGERT, E. M; EVANS, P.G. **Automatic programing and control for steam-heated lumber dry kilns.** Madison, v. 21, n 2, February. 1971.

**ANEXO**

## MODELO DE QUESTIONÁRIO



Nome da empresa \_\_\_\_\_  
Cidade \_\_\_\_\_  
Foco de mercado \_\_\_\_\_  
Tipo de secagem \_\_\_\_\_  
Espécie da madeira \_\_\_\_\_  
Material da construção do secador \_\_\_\_\_

Material usado como isolante térmico \_\_\_\_\_

Descrição do secador \_\_\_\_\_

Dimensões e capacidade do secador \_\_\_\_\_

**SISTEMA DE VENTILAÇÃO**

Nº de ventiladores e Posicionamento \_\_\_\_\_

Descrição dos ventiladores \_\_\_\_\_

Potência dos ventiladores \_\_\_\_\_

Nº de *dampers* ou janelas e posicionamento \_\_\_\_\_

Descrição dos *dampers* ou janelas \_\_\_\_\_

Como é feito o ajuste da velocidade do ar nos períodos de início meio e fim da secagem \_\_\_\_\_

Velocidade do ar nos períodos de início, meio e fim \_\_\_\_\_

Descrição do tipo de controle do sistema de ventilação \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### ***SISTEMA DE AQUECIMENTO***

Tipo de fluido térmico \_\_\_\_\_

Tipo de trocadores de calor \_\_\_\_\_

Dimensões do trocador \_\_\_\_\_

Capacidade de troca térmica \_\_\_\_\_

Pressão nos dutos de transporte do fluido térmico \_\_\_\_\_

Materiais que constituem os dutos \_\_\_\_\_

Vedação dos dutos \_\_\_\_\_

Velocidade do escoamento \_\_\_\_\_

Temperatura nas fases de início meio e fim \_\_\_\_\_

Como é feito o controle da temperatura \_\_\_\_\_

---

---

---

---

### ***CONTROLE DA UMIDADE***

Como é medida a umidade dentro do secador da madeira \_\_\_\_\_

---

---

Como é feito o controle da umidade \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

---

Qual a umidade final desejada \_\_\_\_\_

### ***PILHA DA MADEIRA***

Altura da pilha \_\_\_\_\_

Tamanho da pilha \_\_\_\_\_

Espaçamento dos separadores \_\_\_\_\_

Largura da pilha \_\_\_\_\_

Espessura dos separadores \_\_\_\_\_

Largura dos separadores \_\_\_\_\_

**MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO**

Tipo de manutenção \_\_\_\_\_

Existe plano de manutenção \_\_\_\_\_

Descrição do plano de manutenção \_\_\_\_\_

---

---

---

Grau de instrução do responsável da manutenção \_\_\_\_\_

Grau de instrução do operador \_\_\_\_\_

Existe treinamento para usar os secadores \_\_\_\_\_

Existe treinamento da equipe de manutenção \_\_\_\_\_

Em qual período ambos os treinamentos são feitos \_\_\_\_\_

**SISTEMAS DE CONTROLE**

O controle é manual ou automatizado \_\_\_\_\_

Descrição do sistema de válvulas \_\_\_\_\_

---

---

---

---

Descrição do sistema de controle e como este é feito \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

---

**QUALIDADE FINAL**

Existe alguma análise da qualidade da madeira, descreva \_\_\_\_\_

---

---

---

---

Qual a porcentagem da produção possui defeitos \_\_\_\_\_

---

**PARA SECAGEM A VACUO E AO AR LIVRE**

Descrição do sistema de trocadores de calor \_\_\_\_\_

---

---

---

Descrição do sistema para gerar o vácuo \_\_\_\_\_

---

---

---

Existe algum controle dos índices pluviométricos e de temperatura \_\_\_\_\_

---

---

Tempo de exposição da madeira \_\_\_\_\_

### ***GASTOS***

Existe algum controle de gastos do secador \_\_\_\_\_

---

---

### ***PROGRAMAS DE SECAGEM***

Descreva o programa de secagem utilizado \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

### ***OUTROS***

---

---

---

---

**Imagens da pesquisa de campo:**

Figura 9 Pilhas de madeira



Fonte: O Autor, 2018

Figura 10 Varais para secagem



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 11 Caldeira típica da região serrana



Fonte: O Autor, 2018

Figura 12 Secador de alumínio



Fonte: O Autor, 2018

Figura 13 Ventiladores dos secadores



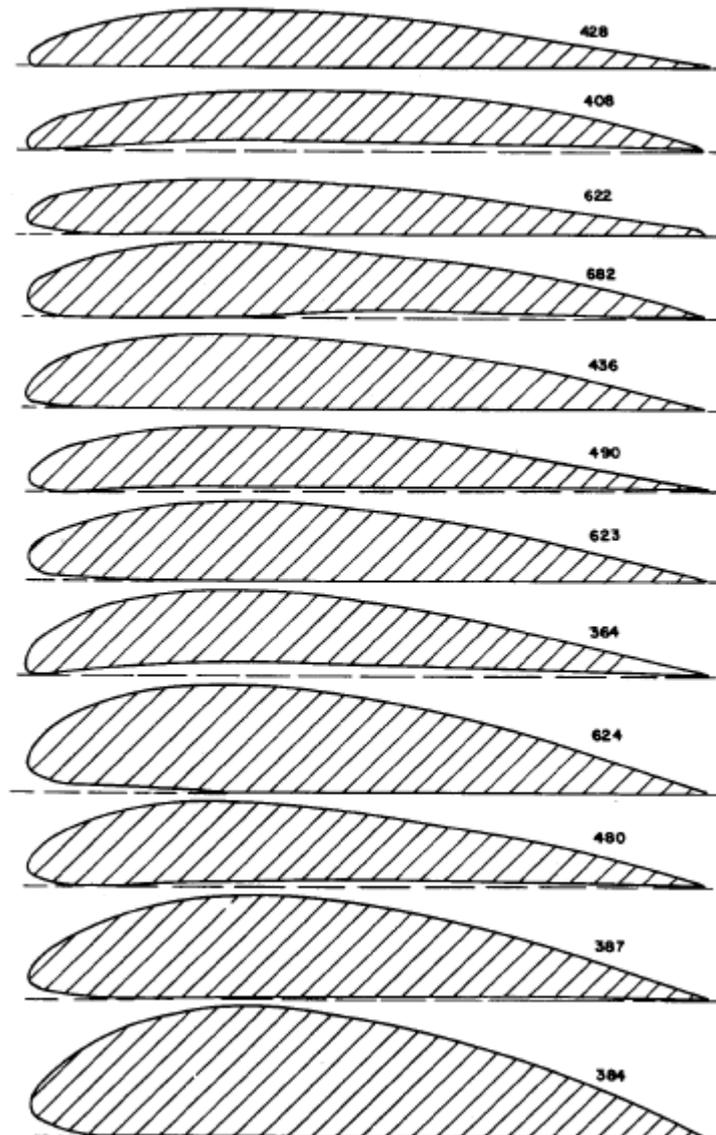
Fonte: O Auto, 2018

Figura 14 Trocadores de Calor dos secadores



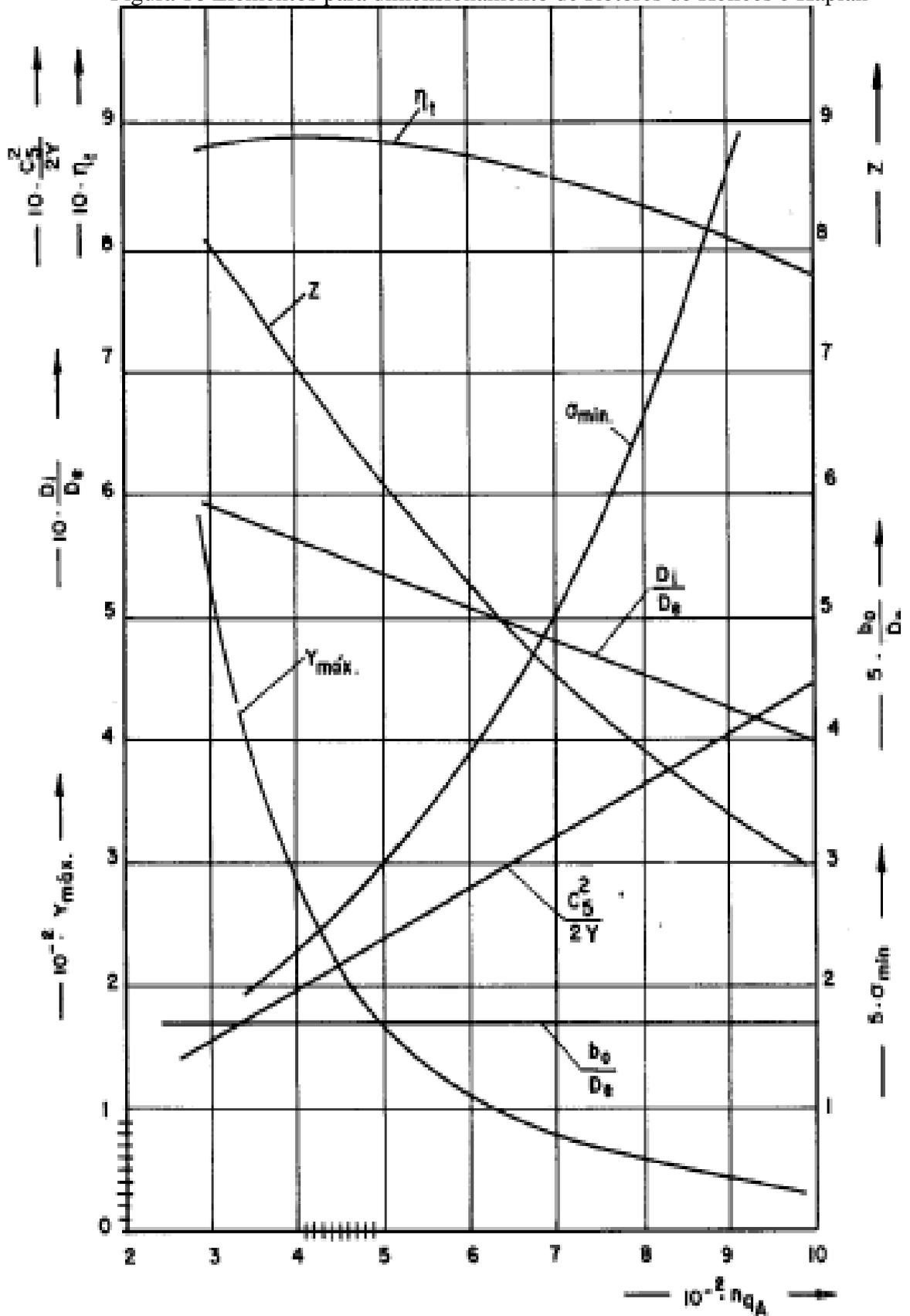
Fonte: O Autor, 2018.

Figura 15 Tipos de perfis



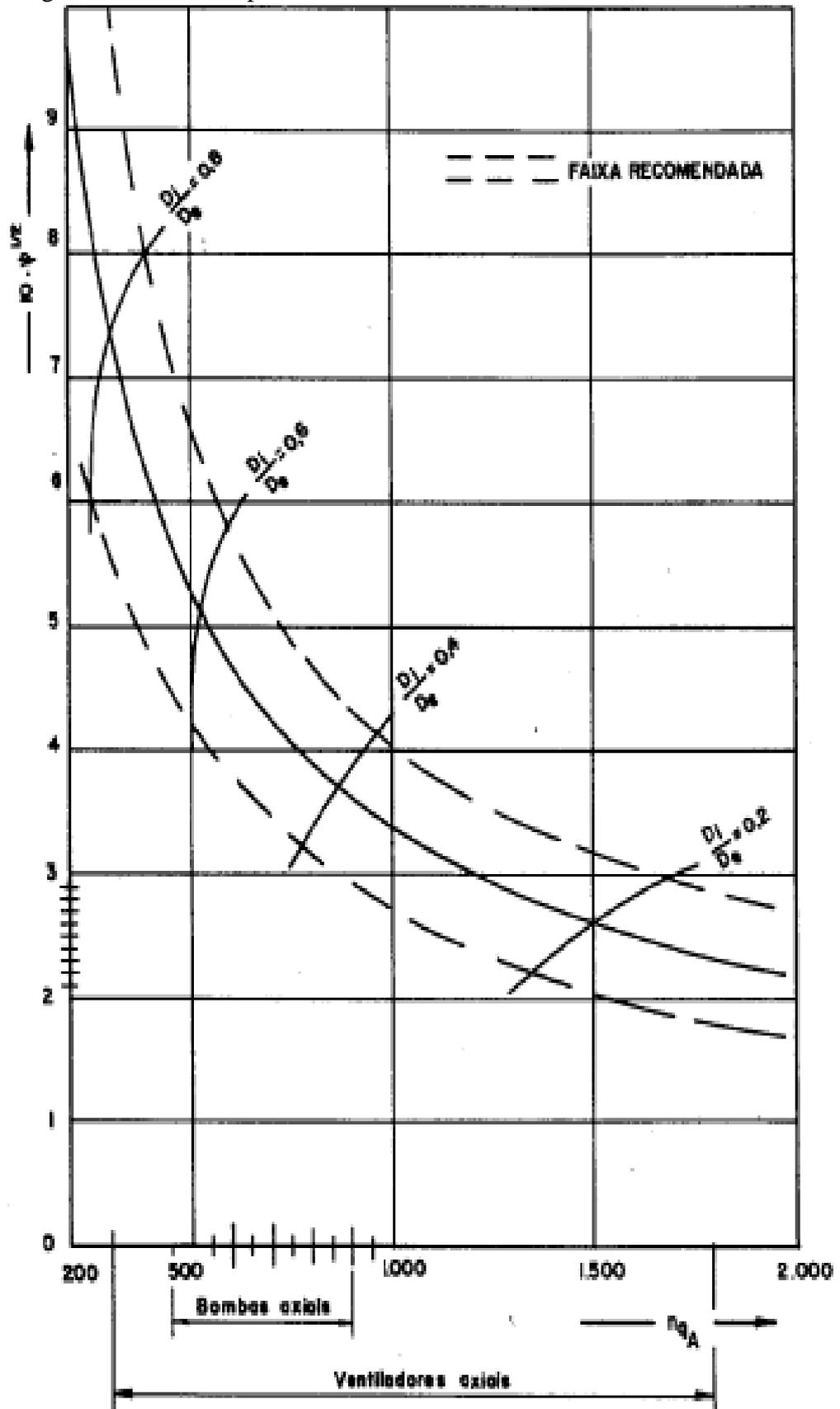
Fonte: Bran e Souza (1969)

Figura 16 Elementos para dimensionamento de Rotores de Hélices e Kaplan



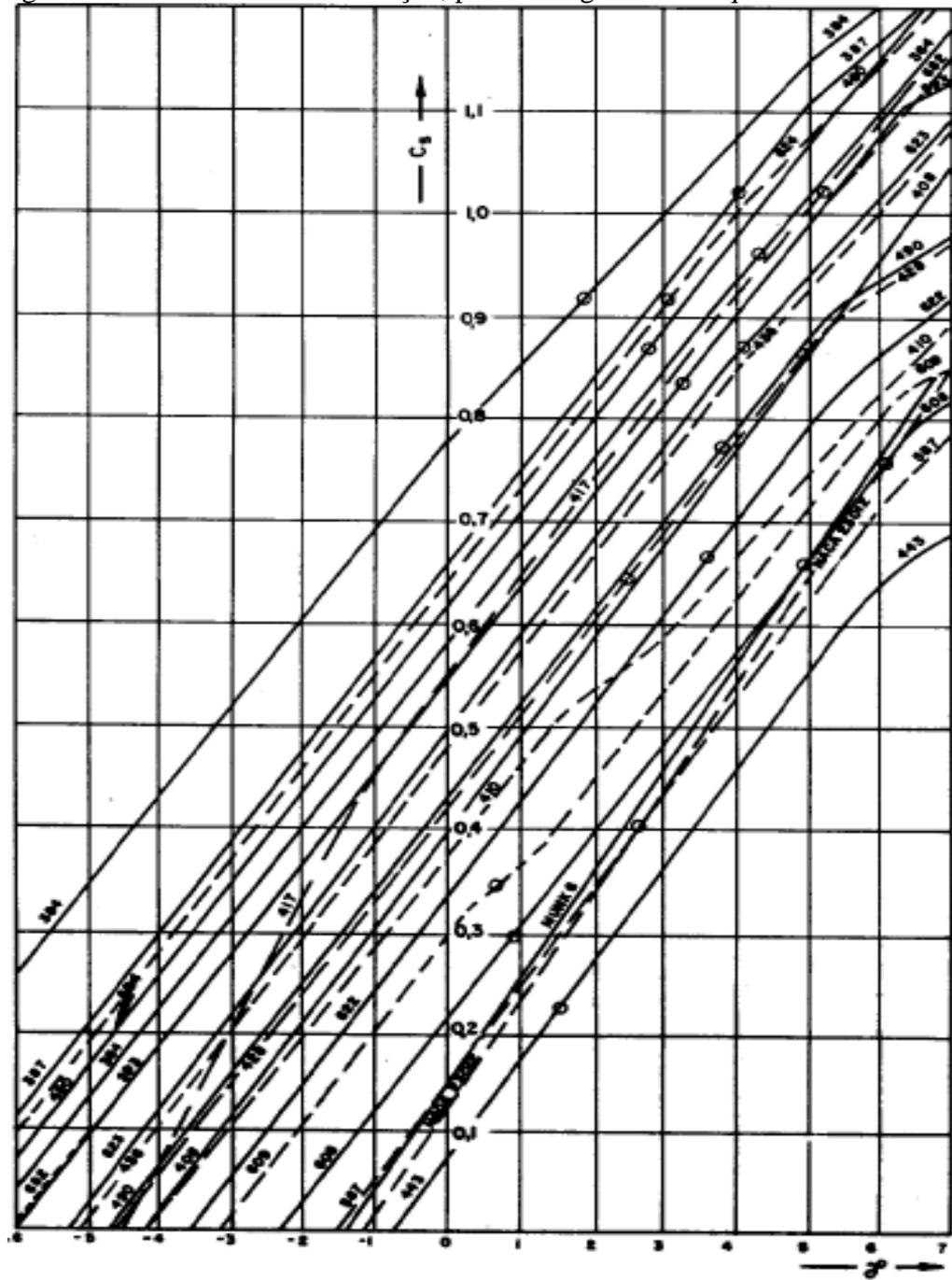
Fonte: Bran e Souza (1969)

Figura 17 Elementos para dimensionamento de bombas e ventiladores axiais



Fonte: Bran e Souza, 1969

Figura 18 Coeficiente de sustentação, perfis e ângulos de ataque correlacionados



Fonte: Bran e Souza, 1969



Figura 20 Dimensões dos perfis

$z$		0	2,5	5,0	10	20	30	50	70	90	100
304	$y_1$	0,85	5,45	7,30	9,65	11,85	12,50	11,10	7,55	2,90	0,10
	$y_2$	0,85	0,05	0,35	0,65	1,30	1,70	1,80	1,25	0,45	0,10
384	$y_1$	4,15	8,95	11,45	14,95	18,55	19,70	17,55	11,80	4,15	0,00
	$y_2$	4,15	1,55	1,10	0,55	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
387	$y_1$	3,20	7,85	9,40	11,95	14,40	15,05	13,35	8,90	3,25	0,15
	$y_2$	3,20	1,05	0,55	0,10	0,00	0,20	0,45	0,45	0,15	0,15
408	$y_1$	1,15	3,80	5,00	6,70	8,40	9,05	8,40	6,25	3,45	0,75
	$y_2$	1,15	0,00	0,20	0,65	1,20	1,30	1,20	0,85	0,30	0,75
428	$y_1$	1,25	3,50	4,90	6,50	8,20	8,55	7,80	5,50	2,15	0,00
	$y_2$	1,25	0,20	0,10	0,00	0,15	0,30	0,40	0,25	0,05	0,00
480	$y_1$	2,55	6,15	7,65	9,80	12,10	12,85	11,80	7,85	2,85	0,00
	$y_2$	2,55	0,20	0,05	0,10	0,70	1,10	1,55	1,25	0,40	0,00
490	$y_1$	2,00	4,80	5,95	7,70	9,20	9,80	8,55	6,05	2,50	0,15
	$y_2$	2,00	0,50	0,15	0,00	0,40	0,95	0,80	0,40	0,00	0,15
587	$y_1$	0,80	2,10	2,90	4,15	5,85	6,55	6,10	4,50	2,35	1,05
	$y_2$	0,80	0,00	0,05	0,30	0,70	0,85	0,45	0,00	0,55	1,05
593	$y_1$	3,00	6,50	7,85	9,75	11,50	12,00	10,85	7,65	3,00	0,00
	$y_2$	3,00	1,35	0,85	0,40	0,15	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
622	$y_1$	2,40	4,50	5,45	6,80	7,70	8,00	7,10	5,00	1,95	0,20
	$y_2$	2,40	1,05	0,60	0,25	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
623	$y_1$	3,25	6,45	7,90	9,90	11,55	12,00	10,65	7,35	2,80	0,20
	$y_2$	3,25	1,80	0,90	0,20	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
634	$y_1$	4,00	8,50	10,40	12,65	15,30	16,00	14,05	9,50	3,55	0,50
	$y_2$	4,00	1,65	0,95	0,40	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
682	$y_1$	3,50	5,55	7,00	8,90	10,65	11,20	10,05	6,90	2,55	0,00
	$y_2$	3,50	0,80	0,25	0,00	0,20	0,55	0,80	0,75	0,35	0,00
NACA	$y_1$	0,00	3,81	4,81	6,43	7,50	7,55	6,41	4,36	1,68	0,00
	$y_2$	0,00	-1,71	-2,36	-2,82	-3,97	-4,48	-4,17	-3,00	-1,23	0,00
MUNK	$y_1$	0,00	3,81	4,81	6,71	7,55	8,22	7,26	4,58	1,56	0,00
	$y_2$	0,00	-2,30	-2,73	-3,34	-3,82	-3,70	-3,94	-2,48	-1,77	0,00

Fonte: Bran e Souza, 1969