

TATIANA SOUZA MÜLLER



**“Redução do Consumo de Energia Elétrica no Processo de
Secagem de *Pinus taeda*”**

CURITIBA
2007

TATIANA SOUZA MÜLLER

**“Redução do Consumo de Energia Elétrica no Processo de
Secagem de *Pinus taeda*”**

**Monografia apresentada ao Curso
de Engenharia Industrial
Madeireira, do Departamento de
Engenharia e Tecnologia Florestal,
do Setor de Ciências Agrárias, da
Universidade Federal do Paraná,
como requisito parcial para a
obtenção do título de “Engenheiro
Industrial Madeireiro”.
Prof. Dr. Ricardo Klitzke.**

**Curitiba
Novembro de 2007.**

TATIANA SOUZA MÜLLER

ESTUDO DA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO PROCESSO
DE SECAGEM DE PINUS TAEDA

Este Trabalho de Conclusão de Curso – foi julgado adequado à obtenção
do requisito parcial para a obtenção de título de Engenheiro Industrial Madeireiro
pela Universidade Federal do Paraná

Local e data.

Banca Examinadora:

Professor:
Presidente da Banca

Professor:
Membro da Banca

Professor:
Membro da Banca

Umberto Klock
Coordenador do Curso

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe que tanta força me deu durante estes anos estudando em Curitiba, ela esteve presente em cada tombo, em cada momento de choro e a cada vez que tentei desistir ela me apoiou e me ajudou a ver que era apenas mais uma fase difícil e como as outras iriam passar.... mas para isso eu teria que ser forte erguer a cabeça e continuar em frente.

Obrigada mãe foi difícil... anos longe de casa... a saudade apertou muitas vezes... mas enfim volto para casa de cabeça erguida, feliz, formada e realizada... em busca de novos desafios e horizontes... sabendo que sempre poderei contar com o apoio dessa pessoa que é um exemplo de vida e de perseverança.

AGRADECIMENTOS

RESUMO

Investir em formas de reduzir custos sem prejudicar a capacidade de produção nem a qualidade do produto produzido tem sido uma forma de empresas madeireiras que buscam novas tendências de mercado globalizadas reduzir custos e se manter como forte fornecedora de produto terminado e insumos.

Somente aquele que tiverem uma visão abrangente em relação à concorrência de mercado de forma segura e econômica sabendo aproveitar as oportunidades de mudanças no mercado serão capazes de vencer o desafio que surge a cada novo período.

O tema do trabalho foi escolhido visto que a secagem de madeira consome grande parte dos custos em energia elétrica de uma planta industrial.

Devido a estas questões e a outras abordadas no trabalho se deu à escolha do tema o estudo dos temas abordados no referencial teórico foi baseado na utilização de livros, internet, temas relacionados com o projeto. A metodologia utilizada foi à metodologia de estudo de caso, que foi estudado os comparativos do tempo e custos utilizados hoje sem o uso de equipamento já comprado e instalado (inversores de frequência) com os custos referentes ao uso do equipamento, visto que o equipamento foi adquirido e esta a disposição para o uso. Finalmente nas conclusões tem todo o levantamento de ambos os modais concluindo a inviabilidade do projeto.

LISTA DE FIGURAS

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO

O conteúdo de água contido na madeira é variável, e sua retirada começa a acontecer logo após sua derrubada.

O processo de secagem então pode ser de forma natural, secagem ao ar livre com o auxílio de ventos e sol, esta secagem não consegue atingir baixos índices de umidade, o processo de secagem também pode ser de forma artificial, através de câmaras de secagem, onde a velocidade do ar e temperatura são variáveis controladas no processo.

Segundo Klitzke (2002, pág 1), a secagem de madeira é fundamental no processo produtivo, sendo responsável por grande parte do valor agregado ao produto final, mas é também uma das ações que mais contribui nos custos no processo de transformação. Por esta razão a busca de maior eficiência no processo de secagem deve ser procurada.

A secagem adequada de madeira irá colaborar para redução dos custos de produção e na qualidade do produto final. Os padrões de qualidade exigidos pelo mercado consumidor tendem a ser cada vez maiores, exigindo madeira seca em estufa, beneficiada e bem bitolada.

Analisando o efeito da velocidade de circulação do ar na taxa de secagem, HILDEBRAND (1970) pondera que velocidades iguais ou superiores a 3,0 m/s são economicamente vantajosas apenas para madeira muito úmida, decrescendo sua influência à medida que a madeira perde umidade. Essa afirmação também foi comprovada experimentalmente por JANKOWSKY (1980), cujos resultados mostraram que a taxa de secagem durante a remoção da água capilar é função da velocidade de circulação do ar, passando a sofrer a influência da temperatura durante a remoção da água higroscópica.

FERNANDES e GALVAO (1978/1979) mostram que a rapidez da secagem está diretamente relacionada com a inclinação do gradiente de secagem e esse gradiente decresce à medida que a secagem progride, diminuindo também a rapidez da secagem.

A secagem de madeira proporciona estabilidade à peça por essa razão ela se torna tão importante quando se necessita transformar através de processo industrial a madeira bruta em beneficiada.

O uso dos inversores de frequência no processo de secagem gera um menor custo de produção, já que a velocidade de ar pode ser direcionada e controlada de acordo com a maior ou menos necessidade.

1.1 HISTORICO DA EMPRESA

FIGURA 1 – Foto aérea da planta em Rio Negrinho.



A empresa Terranova Brasil Ltda está localizada em Rio Negrinho, Santa Catarina, na Rodovia Br 280, nº 4116, Bairro Industrial Sul. É uma empresa de base florestal pertencente ao Grupo Florestal Terranova S/A, com sede no Chile. Sua origem partiu da necessidade de crescimento e consolidação no mercado mundial.

Foi legalmente constituída em junho de 1997, data em que adquiriu o patrimônio florestal do Complexo Seiva S/A, pertencente ao grupo Gerdau S/A.

A escolha de Santa Catarina foi devido às condições climáticas favoráveis ao reflorestamento, à cultura regional sobre a produção da madeira serrada, móveis, celulose, papel e adequada infra-estrutura rodoviária e portuária.

A Missão da Terranova Brasil (2003) é “Desenvolver posições sustentáveis para produtos florestais nos mercados nos quais queremos participar, criando valores para nossos acionistas, nossas pessoas e a sociedade”.

A Terranova Brasil é uma empresa do ramo madeireiro, que desenvolve atividades florestais e de processamento industrial de madeira de pinus, onde o produto é destinado assim: 73% EUA (Molduras), 12% Chile (Stop e Chapa, madeira classificada que serve para componente de porta), 11% México (Madeira de Medula, classificada que serve para a confecção de pallets) e 4% que equivale ao resto dos produtos vendidos (tora grossa, serragem seca e verde, cavaco e mercado interno).

A Empresa respeitando o seu compromisso com o desenvolvimento sustentável realiza suas atividades de forma consciente, utilizando florestas plantadas e contemplando a preservação do meio ambiente, a viabilidade econômica e o estabelecimento de relações justas, objetivando a sustentabilidade de suas atividades.

A MASISA S/A é uma sociedade anônima dedicada ao reflorestamento, plantação de pinus e comercialização de painéis derivados de madeira. O grupo teve início com sua primeira indústria na cidade de Valdivia, Chile, em 1960 com o nome de Madeiras Aglomeradas LTDA.

Quatro anos depois sua razão social mudou para Madeiras e Sintéticos Sociedade Anônima - MASISA, sigla que originou o seu nome. Um ano depois criou-se a filial Laminadora de Madeiras S/A, produtora de lâminas, compensados e portas, e em 1967, a filial Florestal Tornagaleones LTDA.

Mais tarde, no ano de 1968, as atividades industriais se estenderam à zona de Concepción, numa fusão com a Sociedade Madeiras Aglomeradas Pinihue S/A, somando mais uma linha de produção de aglomerados em Chiguayante. Porém, foi em 1984 que as atividades cresceram significativamente com a aquisição da Sociedade Madeiras e Painéis S/A Mapal.

Um complexo industrial composto por duas linhas de aglomerados, uma linha de revestimentos e outra de impregnação de papéis. No final de 1989 constituiu-se o filial Químico Coronel S/A, dedicada à fabricação de resinas adesivas para suprir todas as plantas, insumo chave para a qualidade dos produtos MASISA. Nesse mesmo ano, constituiu-se ainda a filial Aserraderos Aragón S/A, para beneficiamento de madeira e fabricação de painéis sarrafeados.

Em 1992, criou-se a filial MASISA Argentina S/A para consolidar a gestão comercial das vendas da MASISA na Argentina e executar o projeto do Complexo Industrial de Concórdia. Em 1993, a MASISA em conjunto com outros sócios, constituiu Inversiones Industriais S/A e suas filiais: Transportes Fluviais S/A, Florestal Rio Calle-Calle S/A e Portuária Corral S/A, empresas dedicadas a transportes fluviais, produção de cavacos de madeira, administração e operação de um porto na baía de Coral. Através dessas associações e aquisições, o grupo MASISA cresceu, ultrapassando as fronteiras do Chile, estando presente na Argentina, no Brasil e Peru. Seus produtos passaram a ser comercializado em todos os países americanos, além de Europa e Estados Unidos.

No Chile, deu início à cadeia de distribuição Placacentro que conta hoje com mais de cem lojas, distribuídas na Argentina, Brasil, Chile, Equador, México, Peru e Venezuela, com um trabalho pioneiro e inovador na forma de comercializar seus produtos com qualidade nos serviços e no atendimento.

O Complexo Industrial de Concórdia, na Argentina, com uma tecnologia de última geração, inclui duas linhas de aglomerado, duas linhas de MDF, duas de melamina e uma planta química onde são produzidas resinas para produção dos painéis de madeira aglomerada, painéis de MDF e painéis revestidos com melamina. Desses, uma parte é importada pela MASISA do Brasil Ltda.

As fábricas do grupo, em conjunto, fazem a MASISA líder latino-americana na fabricação de painéis de madeira, com capacidade de produção instalada de mais de 1.900.000 m³ de painéis por ano, empregando cerca de 1,2 mil funcionários em suas 15 linhas de produção, além dos seus escritórios do Chile, Argentina, Brasil, México e Peru.

1.2 TEMA

Estudo da redução do consumo de energia elétrica no processo de secagem de *Pinus taeda* da Empresa MASISA Madeiras Ltda.

1.3 PROBLEMA

O elevado custo de secagem de madeira faz com que os custos industriais sejam elevados, a principal responsabilidade do setor de secagem da empresa é garantir que a madeira seca apresente teor de umidade e qualidade dentro de padrões aceitáveis e trabalháveis. Desta forma questiona-se o por que de não fazer uso de um equipamento instalado e adquirido que tem como função reduzir o consumo de energia elétrica no processo de secagem e sem que se perca a garantia de qualidade e requisitos necessários.

1.4 OBJETIVOS

Reduzir os custos de secagem, através da redução do consumo de energia elétrica por parte dos ventiladores, visando sempre manter as condições de qualidade estabelecidas.

O uso dos inversores de frequência não deve aumentar os tempos de secagem e nem influenciar na qualidade do produto.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a realização do trabalho é importante seguir algumas etapas, analise do funcionamento dos inversores de frequência, identificação dos custos de secagem, cálculos de economia, testes e implementação se possível da nova forma de trabalho.

- REALIZAR um estudo bibliográfico sobre o tema;
- ANALISAR a diferença dos custos entre o uso dos inversores de frequência e seu não uso
- VERIFICAR as variáveis determinantes na utilização do inversor de frequência;
- ANALISAR os pontos fortes e fracos da utilização do inversor de frequência;
- ELABORAR um relatório do estudo à empresa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão apresentadas algumas características da madeira que podem de alguma forma influenciar no processo de secagem. Serão apresentados, fatores e aspectos que demonstram a importância da secagem da madeira para um posterior beneficiamento.

Apresentará um pequeno resumo sobre o processo convencional de secagem de madeira.

O processo de secagem de madeira significa o processo de retirada da umidade (água) até um nível onde se consiga realizar um trabalho mecânico com maior qualidade e acabamento superficial.

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A MADEIRA

O *Pinus taeda* é uma conífera pertencente à família *Pinaceae*, denominada como pinus do sul, que cresce principalmente no sudeste dos Estados Unidos. As principais espécies são: *Pinus taeda*, *Pinus echinata* e *Pinus elliottii*, (KLITZKE, 2002)

2.2 IMPORTÂNCIA DA SECAGEM DE PINUS

Segundo Klitzke (2002), a secagem da madeira de pinus no Brasil é recente. Surgiu no início da década de 80, justamente com o desenvolvimento de indústrias de produtos de madeira sólida de pinus, particularmente a indústria de móveis e produção de maior valor agregado (blocks, blanks, molduras, portas e outros) instalada na região sul do país. Tal processo de desenvolvimento foi impulsionado basicamente pela maturação dos reflorestamentos de pinus implantados durante a vigência dos incentivos fiscais nos anos 60 e 70. Aliada ao fenômeno da globalização quando alguns produtores nacionais identificaram oportunidades de negócios vislumbrando o mercado internacional.

Existe uma grande diferença entre a quantidade de água contida na árvore viva e a que deve possuir a madeira para sua correta utilização em serviço. Por esta razão, se faz completamente necessária a eliminação da água antes de começar a fabricação de produtos finais (mobiliário, estruturas de solo, elementos de carpintaria, etc.), (Seco, Montes e Neves, 1998).

2.3. RAZÕES PARA SECAGEM DA MADEIRA

Segundo Seco, Pontes e Neves (1998), a eliminação da água em excesso é necessária pelas seguintes razões:

- para reduzir a troca dimensional da madeira durante sua transformação
- para evitar as deformações que aparecem na madeira como consequência do processo de secagem
 - para facilitar a mecanização
 - para eliminar o risco de ataque de fungos
 - para reduzir o peso no transporte
- Segundo Ponce e Watai (1985), a madeira serrada bruta, quando sai da serraria, deve ser seca antes de ser processada nos produtos finais. Para Ponce e Watai o processo de secagem é importante, pois:
 - a secagem melhora as propriedades mecânicas da madeira, tais como resistência a compressão, resistência à flexão, dureza, etc.
 - a resistência das uniões ou juntas feitas com pregos e parafusos são maiores em madeira seca do que em madeira verde.
 - a madeira verde não é adequada para a colagem ou tratamento preventivo pela maioria dos processos.
 - a maioria das deformações, empenamentos e rachaduras da madeira ocorrem durante a secagem. Produtos de madeira feitos com madeira seca estão livres da ocorrência de defeitos.
 - a madeira somente pode receber verniz, pintura, laca e outros acabamentos se, pelo menos, for seca ao ar.

- a secagem aumenta a resistência elétrica da madeira, tornando-a isolante e melhorando as suas propriedades de isolamento térmico.
- a secagem é vital para usinagem da madeira, principalmente torneamentos, molduragem, furação, lixamento, etc.
- a madeira seca na construção de fachadas colabora com o equilíbrio da umidade do ar, retirando água, quando o ar está úmido, e cedendo umidade para o ar, quando este está extremamente seco.

Por estas razões, a madeira serrada é em sua maioria seca de alguma maneira, antes de seu uso.

2.4. INFLUÊNCIA DA UMIDADE NAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA

Segundo (Galvão e Jankowski, 1984), o teor de água na madeira influencia acentuadamente, nas suas propriedades físico-mecânicas. A resistência da madeira de uma forma geral decresce com o aumento da sua umidade. A resistência elétrica da madeira é também inversamente proporcional ao seu teor de água, sendo que, de 30% até 0% de umidade, a resistência aumenta cerca de um milhão de vezes.

A variação do teor de umidade ocasiona alterações nas dimensões da medida. Esse fenômeno é denominado de retração e inchamento higroscópico, porque as alterações volumétricas ocorrem como conseqüência de variações no teor de água higroscópica.

2.4.1. Umidade relativa

A umidade relativa do ar úmido é função da pressão de vapor de água e a pressão de saturação, pelo que antes de definida é necessário conhecer o significado de cada pressão.

O ar úmido pode ser considerado como a mistura dos gases, e o ar seco é o vapor de água. O ar exerce uma pressão de valor médio de 760mm/Hg, que será a soma das pressões de ar seco e de vapor de água.

Conforme a quantidade de vapor de água contida no ar cresce também a pressão de vapor, diminuindo a outra componente, a pressão exercida pelo ar seco. E no limite (saturação) esta pressão de vapor adquirirá um valor máximo denominado pressão de saturação e também pressão de vapor. Tanto a pressão de vapor quanto a pressão de saturação variam com a temperatura.

Entende-se por umidade relativa o cociente em percentual entre a pressão de vapor parcial e a pressão de saturação, a uma temperatura dada. Logicamente, seu valor máximo será de 100% (Seco, Pontes e Neves 1998).

2.4.2. Umidade Absoluta

Por umidade absoluta se entende a massa da água contida a cada kg de ar seco, e sendo mais normal referir-se a volume m^3 . Existem tabelas que permitem calcular a quantidade de vapor de água (em gramas) existente em um m^3 de ar a temperatura e umidade relativa dada, assim como a quantidade de absorção de vapor de água residual que tem este ar (Seco, Pontes e Neves 1998,).

2.5. ASPECTOS FISICOS RELACIONADOS COM A SECAGEM DE MADEIRA

Neste tópico são descritos aspectos importantes relacionados com a secagem da madeira.

2.5.1. Teor de Umidade

Segundo Seco, Pontes e Neves (1998), a umidade da madeira se define como o coeficiente entre a massa de água presente e a massa anidra da madeira, expresso em percentual.

$$h = \frac{M_h - M_o}{M_o} * 100\%$$

h = umidade da madeira (%)

M_h = massa da madeira úmida

M_0 = massa da madeira totalmente seca (anidra)

A umidade da madeira em estado completamente verde apresenta grandes variações de uma espécie para outra e também segundo a posição que ocupa dentro da árvore e da época do corte.

A água esta presente na madeira como água livre e água impregnada.

2.6. MOVIMENTO DA ÁGUA NA MADEIRA

A secagem da madeira é um fenômeno que consiste na eliminação superficial da água, uma vez que esta migra desde o interior até o exterior da madeira, (Seco, Pontes e Neves 1998).

Segundo Galvão e Jankowski, (1984), apesar de varias forças poderem atuar conjuntamente na secagem, para melhor compreender os fenômenos que atuam no processo é conveniente considerar separadamente:

- movimento da água capilar
- movimento da água higroscópica
- movimento do vapor de água

Diferentes fenômenos físicos acham-se envolvidos nesse processo, dentre os quais predominam:

- fenômenos capilares na movimentação da água capilar (livre);
- fenômenos de difusão da água higroscópica e do vapor de água (impregnação).

2.6.1. Água livre

Segundo Seco, Pontes e Neves (1998), o processo de secagem elimina em primeiro lugar a água livre e em sua continuação uma parte da água de impregnação. A eliminação da água livre se realiza rapidamente e o consumo de

energia que se requiere é relativamente baixo, já que a água livre está fragilmente ligada à madeira.

Segundo Tomaselli e Klitzke (2000) neste ponto a madeira está no que de denomina “ponto de saturação das fibras” (PSF), que corresponde a um conteúdo de umidade entre 26 e 32%. Quando a madeira alcança esta condição suas paredes estão completamente saturadas, mas suas cavidades estão vazias.

Normalmente devem-se utilizar baixas temperaturas durante as etapas iniciais da secagem devido aos riscos associados à remoção rápida da água a altas temperaturas. Devendo-se desenvolver curvas de secagem específicas para cada espécie de madeira e até mesmo entre a mesma espécie dependendo do uso final do produto a ser gerado.

Durante esta fase de secagem, a madeira não sofre variação dimensional, nem alterações de suas propriedades mecânicas. Por esta razão, o ponto de saturação das fibras é muito importante desde o ponto de vista físico-mecânica e também de algumas propriedades elétricas da madeira.

2.6.2. Água de impregnação

Segundo Seco, Pontes e Neves (1998), a eliminação da água de impregnação é mais lenta e segue enquanto a secagem avança, tanto em tempo quanto em quantidade de energia que se necessita, já que a água está cada vez mais ligada às células da madeira. Durante esta fase se produzem trocas dimensionais já que estamos eliminando a água que se encontra na parede celular.

Segundo Tomaselli e Klitzke (2000), a água de impregnação move-se por difusão através das paredes celulares, em consequência de forças originadas pelo gradiente de umidade. A rapidez ou facilidade de secagem (coeficiente de difusão da água higroscópica (impregnada)) varia diretamente com a temperatura e umidade, inversamente com a densidade, dependendo da direção estrutural da madeira.

2.6.3. Movimento da água na madeira

Na madeira, durante a secagem, a água geralmente se movimenta de zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade, o que significa que a parte externa deve estar mais seca que o interior da madeira, para que haja secagem. As fibras situadas nesta parte cedem água para o ar, tanto mais rapidamente quanto mais altas forem as temperaturas, menor a umidade do ar envolvente e maior a velocidade deste ar.

Após a diminuição da umidade da superfície, há movimentação da umidade do interior para a parte externa, qual é evaporada e absorvida pelo ar. Deste modo, começa a se formar um gradiente de umidade, isto é, a madeira apresenta diferentes umidades de acordo com a distância até a superfície (Ponce e Watai, 1985).

A umidade move-se, na madeira, na forma de líquido ou vapor, mais rapidamente em altas do que em baixas temperaturas, através de vários tipos de passagens, as quais consistem de cavidades das fibras e vasos, células radiais, pontoações, aberturas, dutos de resina, etc. Desloca-se praticamente em qualquer direção, tanto lateral quanto longitudinal, no entanto a difusão longitudinal é de 10 até 15 vezes mais rápida do que na direção tangencial.

Segundo Seco, Pontes e Neves (1998), em ocasiões a madeira apresenta capilares de tamanho extremamente reduzido, fazendo com que as tensões geradas sejam muito elevadas, chegando a superar a máxima ao esmagamento da madeira, produzindo então um fenômeno de achatamento das fibras (similar a que ocorre quando se respira fortemente uma água contida em uma bacia de plástico), conhecido como colapso. A presença de bolhas de ar no interior das cavidades celulares faz com que seja muito difícil a aparição de colapso, motivo pelo qual este só apresentar-se em madeiras altamente impermeável (capilares reduzida) e em zonas onde não existam bolhas de ar. Isto explica a causa por que o colapso se propicia unicamente em determinadas madeiras muito impermeáveis

(por exemplo, em eucalipto) e somente na primeira fase de secagem, quando esta está totalmente verde.

2.6.4. Gradiente de umidade

Somente em madeira recém cortada se encontra uma distribuição mais ou menos uniforme do conteúdo de umidade através da seção transversal de uma peça. Assim que começa a secagem, seja natural ou artificial, a distribuição do conteúdo de umidade no interior da peça se modifica. De forma simples pode se explicar a secagem da madeira como resultado do movimento da umidade desde o interior até a superfície, onde se evapora e escapa para a atmosfera circundante (Tomaselli e Klitzke, 2000)

A diferença entre o teor de umidade do centro da peça e da superfície denomina-se gradiente de umidade (GU), significando que quanto maior a diferença entre o teor de umidade da superfície e do centro mais elevado é o gradiente de umidade.

Elevados gradientes de umidade podem ocasionar que partes internas da peça de madeira atinjam rapidamente um conteúdo de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), impedidas de contrair, porque a capa interna ainda contém muita água livre. Este fenômeno irá gerar tensões na madeira que podem acarretar em deformações importantes, pode ainda causar interrupções na circulação da água pela formação de uma capa muito seca que obstrui o fluxo capilar da umidade originando-se o fenômeno chamado endurecimento superficial (Tomaselli e Klitzke, 2000).

2.7. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA MADEIRA

Segundo Galvão e Jankoswsky (1984), dos vários métodos existentes para determinação da umidade da madeira serão discutidos apenas os mais utilizados. Neste caso somente será descrito o método utilizado é o de medidores elétricos.

2.7.1 MEDIDORES ELÉTRICOS

Os medidores elétricos são aparelhos de grande utilidade pela forma imediata como determinam a umidade da madeira. Suas Principais Características são:

Dentre os medidores elétricos, os mais populares são os de resistência elétrica. São baseados na resistência oferecida pela madeira à passagem de corrente elétrica, que varia inversamente com a umidade.

Os medidores dão resultados menos acurados que o método de estufa, porém o teor de umidade pode ser determinado de forma imediata. Normalmente, a escala dos resistores oscila de 7% a 25% de umidade, porque acima do ponto de saturação das fibras (PSF) a variação da resistência com o teor de água não é acentuada. Por essa razão, dentre outras, os medidores são usados na faixa de umidade mencionada, que é aquela importante quando se trabalha com a madeira.

As agulhas devem ser cravadas paralelamente a direção das fibras porque, dependendo da espécie da madeira a resistividade pode ser duas ou três vezes maior na direção normal às fibras.

Segundo Rodrigues e Sales (2000), a madeira quando seca é excelente isolante elétrico, porém quando a umidade aumenta, essa característica diminui fazendo com que a madeira passe a conduzir a corrente elétrica.

Uma etapa fundamental no processo de utilização da madeira é a determinação do teor de umidade, possibilitando com isso controlar o custo de produção e qualidade do produto, bem como controlar as variáveis do processo.

A resistência a passagem da corrente elétrica em um dado teor de umidade da madeira varia com a espécie, portanto, torna-se necessário determinar um fator de correção para cada espécie. A temperatura também é um fator que afeta a resistência elétrica da madeira. A resistência elétrica da madeira diminui com o aumento da temperatura.

2.8. FATORES INERENTES AO AMBIENTE DE SECAGEM

Tanto na secagem em estufa como na secagem ao ar livre a água é removida da superfície da madeira por evaporação. A velocidade de evaporação é controlada pela temperatura, umidade relativa e pela velocidade do ar que passa pela pilha de madeira. Para entender a mecânica do processo de secagem é necessário familiarizar-se com as leis da evaporação e suas relações com os parâmetros de controle, (Klitzke, 2002).

2.8.1 Temperatura

O calor é necessário para evaporar a umidade da madeira. Quanto mais alta a temperatura do ar maior é a taxa de saída de umidade do interior da madeira para a superfície. Fisicamente o calor é a fonte de energia da qual as moléculas de água contidas na madeira adquirem energia cinética necessária para sua evaporação. A velocidade de evaporação depende da quantidade de energia (calor) aplicada por unidade de tempo e da capacidade do meio (ar) para absorver umidade da madeira.

Em estufa a energia fornecida é por convecção, é importante ressaltar que a temperatura mais a umidade relativa do ar irão determinar o clima na estufa de secagem e o equilíbrio do conteúdo de umidade da madeira.

Madeiras medianas ou leves (coníferas) a temperatura ideal para obter uma qualidade excelente da madeira fica em torno de 70° a 90°C. Para uma qualidade regular pode-se chegar a uma temperatura de 120°C. Para madeiras de peso médias e pesadas a temperatura fica em torno de 60° a 80°C. Algumas espécies de folhosas sofrem descoloração com umidade relativa acima de 65% e temperatura acima de 60°C, devidas reações químicas ocorridas com a lignina e as polioses, (Klitzke, 2002).

2.8.2. Circulação do ar

A circulação do ar tem por finalidade transferir calor do sistema de aquecimento para o secador distribuir o calor uniformemente por todo o secador misturar e condicionar o ar (UR e temperatura) antes da sua passagem pela carga de madeira; e remover a água da superfície da madeira.

A circulação do ar, dependendo do tipo de estufa, é obtida naturalmente ou por meio de circuladores acionados eletricamente. Na circulação natural, utiliza-se o princípio de que o ar quente sobe e o ar frio desce. Assim, mediante o correto posicionamento e controle das entradas de ar seco e frio e saída do ar úmido, obtém-se velocidade de até 9m/min (0,15m/s). Na circulação forçada, obtida com o auxílio de circuladores acionados por motores elétricos, as velocidades variam geralmente de 21 a 120m/min (0,35 a 2m/s). Velocidades maiores somente deveriam ser aplicadas para umidades iniciais elevadas.

Deve-se considerar que a velocidade do ar é importante nos estágios iniciais de secagem e para altos teores de umidade, decrescendo a sua importância à medida que a madeira aproxima-se da umidade de equilíbrio, (Galvão e Jankoswsky, 1984).

2.8.3. Umidade relativa

A umidade relativa está diretamente relacionada com a capacidade do ar em receber maior ou menor quantidade de vapor d'água e com a remoção da água das superfícies da madeira. Nos secadores, o controle da umidade relativa é obtido por quatro diferentes maneiras:

- pelo sistema de aquecimento, através do fornecimento da vapor
- pela admissão de ar mais seco e frio do exterior
- e pela eliminação do ar úmido do interior do secador (Galvão e Jankoswsky, 1984)

A umidade relativa é a relação entre a pressão de vapor parcial e a pressão de vapor saturado.

$$UR=(P/P_0)\times 100(\%)$$

Onde :

UR= umidade relativa do ar

P= pressão de vapor parcial (g/cm^3)

P_0 = pressão de vapor saturado (g/cm^3).

Uma forma de medir a umidade relativa é por meio de psicrômetro (TBS/TBU), utilizado nas câmaras de secagem. Consiste em dois termômetros idênticos (PT100) sendo, que um deles o bulbo permanece livre (TBS), medindo a temperatura do ambiente. O outro termômetro, chamado de úmido (TBU) sua parte sensível é coberta com uma tela de algodão úmida a qual fica mergulhada dentro de um reservatório com água limpa, normalmente ocorre uma diferenciação entre as duas temperaturas medidas.

Quanto maior a diferença entre os dois termômetros menor será a umidade relativa do ambiente. No entanto se os dois termômetros estiverem com a mesma temperatura, significa que a umidade relativa é igual a 100%, (Klitzke, 2002).

Abaixo é demonstrado o equipamento de medição de temperatura instalados nas estufas Mahild analisadas.

FIGURA 2 – Termômetro de bulbo seco (TBS) e termômetro de bulbo úmido (TBU).



2.8.4. Ponto de orvalho

A umidade relativa ambiente é normalmente inferior a 1, indicando que a pressão existente de vapor, ou pressão parcial (P) é menor que a pressão de saturação (P_0). Quando a temperatura de um ambiente ou de um objeto chega-se ao ponto que ocorre a condensação de vapor d'água na superfície do objeto este ponto é denominado temperatura de ponto de orvalho.

O ponto de orvalho ocorre quando há uma redução repentina na temperatura, fazendo com que a pressão parcial de vapor d'água atinja a pressão saturada de vapor d'água ocasionando a formação de água na forma líquida (precipitação), (Klitzke, 2002).

2.8.5. Umidade de equilíbrio

A madeira é um material higroscópico, isto é, possui a capacidade de tomar ou ceder umidade em forma de vapor. Existe um momento em que a

madeira deixa de perder ou ganhar moléculas d'água, este momento é chamado de equilíbrio higroscópico da madeira.

Fisicamente a umidade de equilíbrio ocorre quando a pressão interna de vapor d'água na parede celular for igual a pressão externa de vapor d'água. A umidade de equilíbrio é obtida em função da umidade relativa e da temperatura.

A umidade de equilíbrio é fundamental para a condução da secagem artificial, ela é afetada pela umidade relativa do ambiente, pela temperatura sofrendo influencia da espécie, do teor de extrativos da porcentagem de cerne e alborno de uma mesma espécie, (Klitzke, 2002).

TABELA 1 - Teores de umidade finais recomendados para alguns produtos de madeira

PRODUTOS	UMIDADE (%)
Madeira serrada comercial	16 - 20
Madeira para construção externa	12 - 18
Madeira para construção interna	8 - 11
Painéis	6 - 8
Piso e lambris	6 - 11
Móveis para interiores	6 - 10
Móveis para exteriores	12 - 16
Equipamentos esportivos	8 - 12
Brinquedos para interiores	6 - 10
Brinquedos para exteriores	10 - 15
Equipamentos elétricos	5 - 8
Embalagens	12 - 16
Formas de calçados	6 - 9
Coronhas de armas	7 - 12
Instrumentos musicais	5 - 8
Implementos agrícolas	12 - 18
Barcos	12 - 16
Aviões	6 - 10

Fonte: Ponce e Watai 1985.

TABELA 2 - Umidade relativa do ar (UR) e umidade de equilíbrio da madeira (EU) em função das temperaturas dos termômetros de bulbo seco e termômetro de bulbo úmido (Ponce e Watai, 1985).

A tabela deve ser utilizada com os valores de temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido. Calcula-se o valor da diferença entre as duas temperaturas. Faz-se uma interseção da linha com o valor da temperatura de bulbo seco com a coluna que indica a diferença de temperatura. Dessa forma, obtém-se o valor da umidade de equilíbrio ou da umidade relativa, conforme desejado.

2.8.6. Potencial de secagem

Segundo Klitzke (2002), a relação entre a temperatura atual e a umidade de equilíbrio denomina-se potencial de secagem (PS). O potencial de secagem irá determinar a forma e o progresso da secagem da madeira. Podendo ser calculado da seguinte maneira:

$$PS = TU \text{ atual} / UE$$

Onde:

Ps= potencia de secagem

TU atual= teor de umidade atual calculado (%)

UE= umidade de equilíbrio calculado (%)

Potenciais de secagem elevados produzem altas taxas de secagem reduzindo o tempo, causando uma secagem excessiva das capas superficiais da madeira com o risco de formação de tensões internas, gretas, deformações e endurecimento superficial. Um valor ótimo do potencial de secagem depende de vários fatores:

- Espécie
- Espessura da madeira
- TU inicial
- Tipo de câmara

3.0 SECAGEM CONVENCIONAL

Segundo Tomaselli e Klitzke (2000), a secagem convencional ou artificial é o processo de secagem mais utilizado no mundo inteiro, se desenvolve a temperatura de 50 a 100°C sendo conduzida em câmaras ou estufas, nas quais se podem controlar a temperatura, a umidade relativa e velocidade do ar. A velocidade do ar fica em torno de 1,5 a 2,5m/s constantes a capacidade das câmaras é variável.

Porém segundo Pezo (2007) o sistema de ventilação Mahild deve gerar uma velocidade de saída de ar da madeira entre 5 e 7m/s.

Segundo Seco, Pontes e Neves (1998, pág.62), o ar impulsionado pelos ventiladores, atravessa o sistema de aquecimento onde é necessário se aquecer até a temperatura desejada, seguindo, atravessa o sistema de umidificação que permite se necessário umedece-lo. Uma vez climatizado o ar é dirigido até as pilhas, atravessando pelos espaços livres que são deixados entre as diferentes capas de madeira. Conforme o ar atravessa as pilhas vai aumentando sua umidade com o vapor d'água retirado da madeira e vai diminuindo sua temperatura, pois ao atuar como fluido térmico cede calor a madeira para que esta evapore seu excesso de umidade. Por outro lado na saída das pilhas o ar está mais frio e úmido do que na entrada.

Uma vez que o ar frio e úmido se encontra no outro lado da pilha a carga de madeira, é absorvido pelos ventiladores para completar o percorrido e volta a repetir o processo anterior. No circuito de retorno, parte da carga de umidade é expulso para o exterior pelas tampas de ventilação (dumpers), que na ocasião incorporam pequenas quantidades de ar. Ao mesmo tempo em que expulsa parte do ar da entrada procedente do exterior, o qual se mescla com o ar interno dirigindo-se até os ventiladores e cessando o circuito. A entrada de ar mais frio e úmido do exterior faz baixar a temperatura relativa do secador.

A regularização da quantidade de ar que entra e sai do secador permite, por sua vez, a regularização do excesso de umidade relativa interna.

Em algumas ocasiões para minimizar as perdas caloríficas do secador, o ar quente pode passar por um trocador de calor, que permite pré aquecer o ar entrante e frio e diminuir a energia necessária para sua elevação térmica até a temperatura necessária.

3.1 SISTEMA DE VENTILAÇÃO

Segundo Tomaselli e Klitzke (2000), como a circulação de ar deve ser no sentido transversal. Os ventiladores são axiais, quase sempre com giro reversível para conseguir uma ótima distribuição do fluxo de ar na largura e na altura da câmara de secagem. Localizando-se sobre um falso teto que forma uma

câmara separada do recinto onde se empilha a madeira, os motores devem ser construídos para suportar temperaturas e umidades relativas altas.

Tão importante quanto a velocidade de circulação do ar é a distribuição do fluxo de ar através das pilhas de madeira. Considera-se que a velocidade do ar entre 2 e 4 m/s são adequadas para a maioria das espécies de madeira. Mesmo operando com velocidades adequadas, se o fluxo não for uniforme em toda a seção transversal do secador, parte da carga secará mais rapidamente e prejudicará o tempo de secagem ou a qualidade da madeira.

3.2. CONTROLE DA TEMPERATURA

Segundo Tomaselli e Klitzke (2000) os damper's são controlado automaticamente por meio de eletroválvulas pneumáticas, que se abrem ou se fecham passando ao meio de aquecimento as necessidades do programa de secagem.

3.3 CONTROLE DA UMIDADE RELATIVA

Para a medição de umidade relativa é utilizado o psicrômetro. Conforme Galvão e Jankowsky (1985), este dispositivo é composto por dois sensores de temperatura do tipo PT100, sendo que um deles mede a temperatura de bulbo seco (TBS) e o outro mede a temperatura de bulbo úmido (TBU). O termômetro de bulbo seco é responsável pela medição da temperatura do ar interno do secador, já o termômetro de bulbo úmido, tem seu bulbo envolto por um tecido umedecido. Caso o ar esteja saturado os dois termômetros registrarão a mesma temperatura. Quanto mais seco o ar, maior a diferença de temperatura entre os dois termômetros.

3.4. FASES DE SECAGEM

Segundo Seco, Pontes e Neves (1998), uma vez que já está carregado o secador, foram colocados corretamente os pinos sensores e está comprovado seu funcionamento, se estabelecem às condições de secagem para as distintas fases em que se pode dividir o processo.

- Fase de Aquecimento

A fase de aquecimento da madeira se inicia quando se alcança dentro da estufa a temperatura de começo de secagem definida no programa de secagem.

O aquecimento deve se realizar em um ambiente muito úmido, superior ou igual a 85%, para melhorar a transferência calorífica que existe na madeira e evitar sua secagem rápida.

- Fase de Secagem (eliminação da água)

A secagem de madeira consiste na eliminação da água desde a superfície da peça até que se consiga que a água migre de seu interior até sua superfície. Deve-se conseguir o adequado ritmo e sentido de movimento da água desde o interior da madeira até a superfície, é necessário levar a secagem de forma que os gradientes de umidade se dirijam do interior e que tenham o valor adequado as características de cada madeira.

Em secagem por ar quente climatizado, o ar é o agente secante e as variáveis que regulam o ritmo e as características do processo são a temperatura e a umidade relativa. A secagem se controla variando ambas as variáveis, de forma que os gradientes de temperatura e umidade se dirijam até o exterior.

- Fase de Acondicionamento

Sua finalidade é eliminar, em uma proporção importante o problema de tensão. Este tratamento se aplica durante períodos de 4 a 8 horas dependendo da espécie e espessura.

- Fase de Resfriamento

Uma vez finalizado o processo de secagem não se deve abrir imediatamente as portas do secador, já que isso provocaria um forte choque térmico na madeira que poderia produzir trincas superficiais nas peças.

A forma correta de efetuar a redução térmica é abrir os dumpers para ventilação, fechar o sistema de aquecimento e manter a ventilação, até uma diferença de temperatura de 20 a 30°C.

3.5. DEFETOS CAUSADOS PELA SECAGEM

Segundo Klitzke (2002), Na secagem convencional, o controle na ocorrência de defeitos está quase sempre ligado à adequação do programa utilizado.

- Empenamentos

O empenamento se define como a deformação que experimenta uma peça de madeira pela curvatura de seus eixos longitudinal, transversal ou ambos.

- Colapso

Ocorre quando os esforços de tensão capilar excedem a resistência à compressão perpendicular à grã da parede celular a qual ocorre normalmente quando os meniscos se movem através das pontoações da parede celular. Pode ser resultado da secagem muito rápida com elevado teor de umidade na madeira.

- Rachadura de topo e de superfície

As rachaduras na superfície aparecem quando tensões que excedem a resistência da madeira à tração perpendicular às fibras desenvolvem-se na superfície, devido a uma secagem muito acelerada que produz diferença acentuada entre os teores de umidade da superfície e do centro da madeira. Quanto mais espessa for a madeira, maior a possibilidade do aparecimento de rachaduras superficiais.

As rachaduras de topo são causadas pela secagem rápida das extremidades em comparação com o restante da peça de madeira, principalmente durante a fase inicial.

- Rachadura interna

Aparecem na fase de secagem, quando se desenvolvem as tensões de tração no interior da peça, estas tensões causam rachadura interna.

- Mancha química

As manchas da madeira podem ser produzidas pela ação de fungos ou por alterações químicas que ocorrem com os extrativos solúveis em água. Há evidências que os açúcares e os taninos ambos sujeitos a oxidação, com posterior escurecimento quando exposto ao calor em presença de oxigênio.

4.0 CONSUMO DE ENERGIA NA SECAGEM DE MADEIRA

4.1 ENERGIA ELÉTRICA

Dentro do complexo industrial de transformação da madeira o processo de secagem é que tem maior participação podendo chegar a 50% dos custos de produção. Com a escassez crescente da energia é necessário cada vez mais o aperfeiçoamento das técnicas de secagem que visem à redução do consumo energético (SEVERO 1986).

O consumo de energia na secagem da madeira pode ser dividido em energia para o aquecimento de todo o sistema, para vaporização e para circulação do ar. O aquecimento é responsável por 80% do consumo total da energia na secagem convencional, (KOCH, 1971).

A energia térmica é utilizada como fonte de calor e na forma de vapor no processo industrial (SILVA, 2001).

Segundo KOCH (1972), a escolha do tipo de energia a ser utilizado depende principalmente do custo do processo empregado e do e do tipo de

material em produção. Os resíduos gerados na indústria de transformação da madeira é a principal fonte de energia, utilizados para produzir vapor por meio da queima em caldeira fornecendo o calor necessário para aquecimento das câmaras de secagem.

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

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

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

Devido às características dos ventiladores, pequenas reduções na velocidade do ar causam grandes reduções na energia elétrica. Por exemplo, uma

diminuição de 25% na velocidade do ar resulta em uma redução de até a 50% na energia (SIMPSON 1997). Da mesma forma GARRAHAN (1993) *apud* SANTINI (1996), estudando o efeito da circulação do ar nos custos concluiu que com o uso de mecanismo de controle de velocidade do ar pode-se conseguir uma redução líquida no consumo de energia de até 50% do total consumido.

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

Segundo VRANIZAN & WOHLGEMUTH (1988), estudaram formas de economizar energia elétrica na secagem de madeira. Um método para reduzir quantidades de energia elétrica na secagem convencional de madeira necessita ser bem desenvolvido e testado; resultados mostram que economias podem ser substanciais. Um método pode resultar em reduções de energia elétrica na ordem de 30 a 50% da energia necessária por carga.

E a redução encontrada não causará sacrifícios no tempo e a qualidade da madeira. O maior custo de energia esta na energia elétrica em vez da energia térmica. Normalmente os custos de energia elétrica representam entre 14 e 21% dos custos de secagem.

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

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

4.2. INVERSOR DE FREQUÊNCIA

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

O inversor de frequência é um equipamento versátil e dinâmico e dos mais utilizados em processos automatizados, conjuntamente com o Comando Lógico Processado (CLP). É quase impossível achar um segmento industrial onde seja desnecessária a presença de acionamentos estáticos para motores elétricos, ou seja, os inversores de frequência (YAKSIC, 2001).

4.2.1. Inversor de Frequência no Processo de Secagem da Madeira

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

Segundo CULPEPPER (1990), a redução da vazão abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) reduz os custos de energia elétrica na ventilação em 40 a 50%. A maioria das espécies apresenta um PSF próximo a 30% de teor de umidade. Acima deste ponto a água está nas cavidades das células e sua remoção são por capilaridade até a superfície da madeira. Este é um processo muito rápido e requer movimentação rápida de ar para criar turbulência na superfície e remover a umidade da superfície da madeira. Abaixo do PSF a umidade está ligada na parede e sua remoção são completamente diferentes. A água se move lentamente por difusão de áreas de alta umidade (interior da madeira) para áreas de baixa concentração de umidade (superfície da peça). Baixas velocidades do ar removerão a umidade da superfície sem afetar a

velocidade de secagem. Sistemas computadorizados adotam alguns métodos para detectar o teor de umidade da madeira (ΔT , resistência elétrica, célula de carga, etc.) que podem detectar o PSF com precisão e reduzir a velocidade de circulação do ar automaticamente. Mais alguns benefícios são apresentados:

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

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

4.2.2. Inversor ou Conversor

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

Os ventiladores são cargas de binário variável. As cargas de binário variáveis têm uma relação potência/velocidade que é cúbica, ou seja, a velocidade

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

4.3.1 Vantagens e Limitações do Inversor de Frequência

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

As principais vantagens são:

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

As principais desvantagens são:

- Afetam as harmônicas em semicondutores e em carga não linear, podendo ser tomadas medidas corretivas para evitar seus efeitos.

- Prejuízos ao motor podendo causar a sua queima devido o sobre aquecimento, motores com baixa rotação não podem funcionar com menos que 30Hz;
- O investimento inicial do inversor de frequência é elevado;
- O motor pode ser desclassificado para uso do inversor em função do torque e outras características;
- O uso de muitos inversores pode gerar interferências eletromagnéticas nas linhas podendo ser irradiada e conduzida alterando os sinais nos Comandos Lógicos Processados (CLP's) da fábrica. Pode ser adaptado filtro, cabos blindados para evitar seu efeito.

4.3.2 Características Operacionais do Inversor de Frequência

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

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

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

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

Correntes nos Mancais – Componentes de alta frequência da tensão de modo comum dos inversores de frequência geram um acoplamento capacitivo do motor a terra, sendo que sua via de descarga é o rolamento. Concluindo, o

aumento da frequência de chaveamento melhora algumas características, porém não é uma solução simples de se tomar.

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

5. MATERIAIS E METÓDOS

5.1. CARACTERÍSTICAS DA ESPÉCIE

A espécie utilizada para o estudo foi *Pinus taeda*. Tal espécie vem sendo utilizada em grande escala na região de São Bento do Sul e Rio Negrinho. Em relação aos inversores de frequência foram realizados testes para garantir seu perfeito funcionamento.

5.2 PREPARAÇÃO DA CARGA PARA O PROCESSO DE SECAGEM

A preparação da carga consiste na formação das pilhas a serem secas, empilhamento sobre os vagonetes e carregamento para o interior da câmara de secagem.

Um empilhamento perfeito garante uma melhor circulação do ar no interior da câmara de secagem, os separadores são um item importante, estes devem preferencialmente ser livre de tortuosidade para não atrapalhar a passagem de ar no interior da pilha, além de possuírem dimensões iguais. Os sarrafos separadores possuem as seguintes dimensões: 0,19 x 0,30x 1,80 m.

Empilhamento: o empilhamento é realizado sobre vagonetes com o auxílio de empilhadeiras,

FIGURA 3 – Vagonetes carregados aguardando liberação da estufa.



Carregamento: o carregamento é feito com o auxílio de maquinário especializado, os vagonetes são empurrados para dentro da câmara de secagem.

Como o sistema é realizado por vagonetes o carregamento se torna mais rápido, levando em média 30 minutos para se realizar a troca da carga de secagem.

O carregamento pode ser melhor visualizado na ilustração abaixo.

FIGURA 4 – Carregamento e descarregamento de estufas.



Colocação dos pinos sensores: os pinos sensores são colocados no momento de empilhamento das pilhas de madeira, os mesmos são colocados em pontos determinados ao longo da carga.

As pilhas enviadas para a secagem possuem as seguintes dimensões em média:

As pilhas de madeira possuem as seguintes dimensões:

- Espessura: 1,72 metros
- Largura: 1,39 metros
- Comprimento: 3,15 metros ou 4,15 metros.

Volume total por pacote em média:

- O pacote composto pela espessura e largura estudada possui 361 peças de madeira.
- O que resulta em $4,45\text{m}^3$

As pilhas podem ser observadas na ilustração abaixo.

FIGURA 5 – Visualização da organização e parâmetros de pacote feitos para secagem.



5.3. CÂMARA DE SECAGEM

As câmaras de secagem estudadas são da marca Mahild com fabricação Alemã, na empresa existem instaladas quatro estufas Mahild. Duas delas possuem equipamentos de inversão de frequência duas não possuem. As estufas possuem capacidade de 180m³.

Na figura pode ser visualizada a câmara de secagem, a posição dos vagonetes em seu interior, além da disposição da pilhas de secagem.

A câmara pode ser visualizada na figura abaixo.

FIGURA 6 – Visualização externa das câmaras de secagem analisadas.



5.3.1. SISTEMAS E COMPONENTES DA CÂMARA

- Sistema de ventilação:

O sistema de ventilação é superior, é composto por oito ventiladores cada ventilador possui 25 cv (0,736 kw) de potência, ao total possuindo 200 cv que equivale a 147 kw, sendo projetados para suportar constantemente temperaturas elevadas.

Os ventiladores possuem isolamento do tipo "H", com hélices em alumínio.

Características técnicas dos ventiladores:

- Marca: Weg

Dados do motor:

- Potencia: 18,5 kw = 25 cv
- Carcaça 200P
- 6 polos
- Pás dos ventiladores construídas em aço inoxidável

O ventilador pode ser visualizado na ilustração abaixo.

FIGURA 7 – Visualização do ventilador



O sistema de controle possui característica que permitem a inversão do sentido de giro dos ventiladores, a inversão é feita a cada 3 horas, o que proporciona uma secagem homogênea de toda carga de madeira.

- Fonte de Geração de Energia Térmica Sistema de Aquecimento

A fonte de geração de energia térmica é uma caldeira aquatubular marca Sermatec, que possui as seguintes características técnicas:

- Ano de fabricação: 1999
- Pressão máxima de trabalho: 51kgf/cm².g
- Pressão de teste hidrostático: 76,5kgf/cm².g
- Pressão de saída de vapor: 44 kgf/cm².g
- Temperatura de saída de vapor: 405°c

Sistema de aquecimento, sistema responsável pela elevação da temperatura dentro da câmara de secagem, o sistema de aquecimento é o que torna a secagem mais ou menos lenta. O sistema de aquecimento é composto por válvulas de vapor, tina, trocadores de calor aço inoxidável.

- Sistema de renovação do ar

O sistema de renovação de ar se caracteriza pela troca de ar dentro da câmara de secagem, ele é responsável pela eliminação do ar úmido existente no interior da câmara e pela captação de ar do exterior para o interior da câmara.

O sistema de renovação do ar é composto por um conjunto de 16 dampers, todos com abertura proporcional, isso significa que os dampers somente abrem o necessário para manter as condições desejáveis no interior da câmara.

A abertura é comandada pelo programa de secagem, e são controlados pela diferença psicométrica existente entre os termômetros de bulbo seco (TBS) e termômetro de bulbo úmido (TBU).

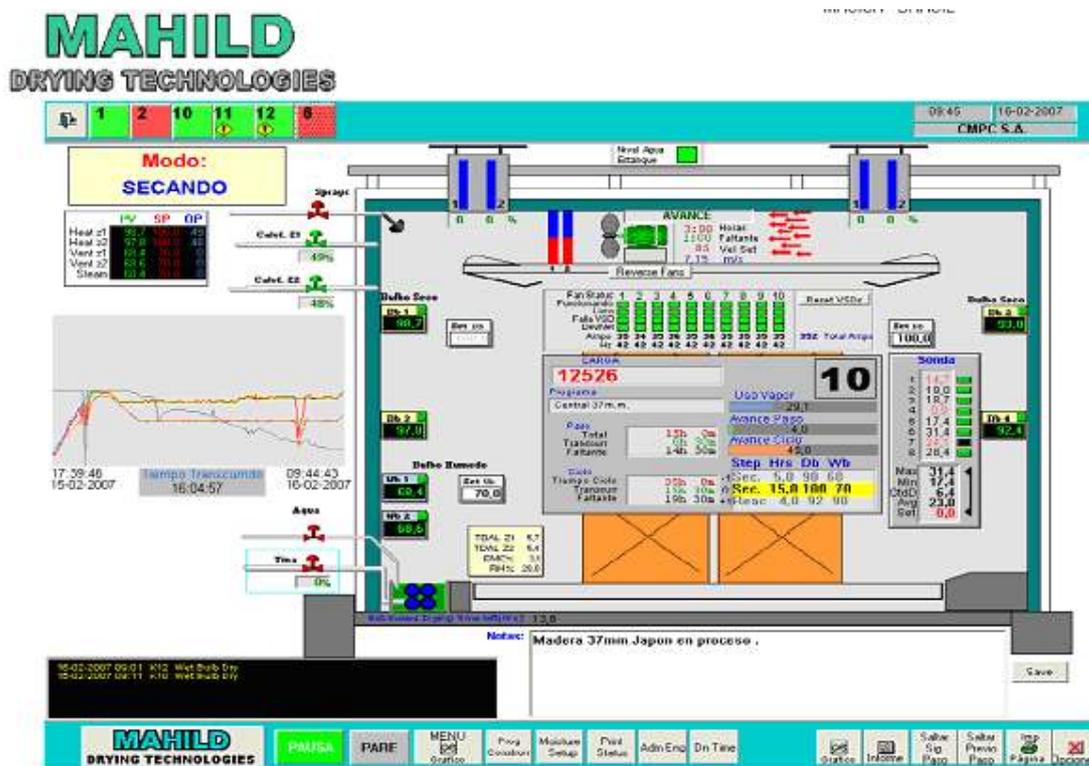
FIGURA 9 – Visualização dos damper's das estufas analisadas.



- Sistema de Controle e Automação

O sistema de controle é realizado por um desktop onde está instalado o supervisório responsável pelo controle de processos de secagem. O supervisório instalado é fornecido pela Mahild, através dele tem-se controle das fases de secagem e das variáveis controladas no processo.

FIGURA 10 – Visualização da tela de controle do programa de secagem (supervisório Mahild).



- Medição da Umidade

As coletas das medidas de umidade da madeira são realizadas por pinos resistivos ligados por cabos sensores, à umidade é medida continuamente desde o início do processo até seu final. Esta informação de umidade possibilita o ajuste de uma curva de secagem respeitando teores de umidade teoricamente indicados para redução de velocidade.

O sistema de pinos sensores é formado por dois pinos cravados na madeira, os pinos devem ser cravados a metade da espessura nominal, para uma leitura mais precisa. São colocados 8 pinos em cada carga, espalhados em locais pré-estabelecidos dentro da estufa.

Quanto à opção de utilização dos pinos sensores, não há segurança (o responsável pela área de secagem na empresa não confia nos pinos sensores) quanto ao seu uso, sendo assim os mesmos são utilizados, porém não é considerada sua informação.

Também se faz uso de equipamentos de régua Wagner para medidas no interior da câmara durante o processo de secagem, a utilização das régua é feita com base no tempo de secagem, operadores entram na câmara para realizar leituras próximo ao final do tempo de secagem, a entrada para medição define a entrada da carga para o próximo estágio de secagem (condicionamento).

- Controle Empírico

O controle de umidade é feito a partir de tempo de secagem: método de menor confiabilidade, já que não se conhece a umidade da madeira e se faz a redução de velocidades apenas com base na experiência e conhecimento do coordenador. Neste caso pode-se desenvolver defeitos de secagem devida ha redução de velocidade em período inapropriado e ainda uma economia não precisa de energia elétrica.

O controle de troca de fase de secagem é feito pelo conhecimento do coordenador de área com base em ciclos de secagem anteriores.

Existe no setor uma tabela com o número de horas pré – estabelecidas de secagem para cada bitola processada, com base nesta tabela os operadores de secagem sabem o momento de entrar na estufa e coletar a umidade da madeira e então iniciar o processo de condicionamento da madeira. A troca de fase de secagem é feita com base em tempo.

5.3.2 MEDIDAS DE VELOCIDADE DO AR

A velocidade de circulação do ar sofre influencia direta da rotação dos motores. Para a coleta de dados referentes à velocidade de circulação do ar foram realizadas coletas variando os percentuais de rotação dos ventiladores.

A coleta de dados de velocidade em diferentes rotações foi realizada com um Termoanemometro, apropriado para a coleta de ar dentro de estufas de secagem, o aparelho é da marca Homis de modelo Hot Wire Anemometer.

A velocidade de rotação dos motores dos ventiladores está diretamente relacionada com o consumo de energia elétrica, com isso foi montada a tabela apresentada a seguir onde consta cada velocidade juntamente com o percentual respectivo de rotação dos ventiladores do ar.

Na tabela 1 podemos observar a coleta da velocidade do ar em relação ao percentual de rotação.

TABELA 3 – Tabela contendo as velocidades de ar coletadas.

Velocidades em m/s	% de utilização dos ventiladores
6,9 m/s	100%
6,7 m/s	90%
6,3 m/s	80%
5,4 m/s	70%
4,6 m/s	60%
4,3 m/s	50%
4,0 m/s	40%

Os pontos de coleta de velocidade distribuídos no interior da câmara de secagem podem ser observados na figura abaixo.

FIGURA 11 - Localização dos pontos de coleta de velocidade do ar (100% de rotação dos ventiladores):

Pilha 5			Pilha 4			Pilha 3			Pilha 2			Pilha 1			Médias	
7,2	7,0	6,8	7,8	7,4	7,1	7,5	7,7	6,9	7,0	6,7	6,7	7,0	6,6	6,4		
7,5	7,2	6,8	7,2	7,1	7,9	7,2	7,2	7,2	6,7	6,8	6,5	6,7	6,6	6,8		
6,8	6,8	7,7	7,1	7,2	7,1	7,1	7,1	7,1	6,5	6,1	6,9	6,8	6,9	6,5		
7,2	7,0	7,1	7,4	7,2	7,4	7,3	7,3	7,1	6,7	6,5	6,7	6,8	6,7	6,6	7,0	
6,4	6,8	7,0	7,2	7,0	7,1	7,3	6,8	6,6	6,9	7,0	6,3	7,0	7,1	6,4		
6,6	7,2	7,0	6,7	7,0	7,5	7,2	6,8	6,8	6,5	7,4	6,9	6,2	6,4	6,6		
6,7	7,0	7,0	6,7	6,8	7,8	7,3	6,9	6,3	7,3	7,2	7,0	6,7	6,4	7,2		
6,6	7,0	7,0	6,9	6,9	7,5	7,3	6,8	6,6	6,9	7,2	6,7	6,6	6,6	6,9		
6,9	6,9	6,8	7,0	6,8	6,9	7,2	6,8	6,9	6,7	7,1	6,6	7,8	7,4	7,1		
6,6	6,7	7,1	6,7	6,8	7,1	7,1	6,8	6,6	7,1	7,0	7,2	7,2	7,1	7,9		
6,5	6,5	7,3	7,1	6,8	7,2	6,8	7,0	7,1	7,0	7,5	7,1	7,1	7,2	7,1		
6,7	6,7	7,1	6,9	6,8	7,1	7,0	6,9	6,9	6,9	7,2	7,0	7,4	7,2	7,4	7,0	
6,9	6,7	6,8	6,9	7,2	7,1	7,0	7,1	7,3	7,0	6,9	7,0	6,9	6,7	6,5		
6,8	6,7	6,8	7,0	7,2	7,1	7,3	7,5	7,2	7,0	7,1	7,0	7,0	6,8	6,9		
7,0	6,9	7,0	6,8	7,2	7,0	7,2	7,0	7,1	7,0	7,0	7,2	7,0	6,7	6,6		
6,9	6,8	6,9	6,9	7,2	7,1	7,2	7,2	7,2	7,0	7,0	7,1	7,0	6,7	6,7	7,0	
Dumper			Média total 7,0											Dumper		
dados coletados em km/h e com resultados apresentados em m/s.																

FIGURA 12 - Localização dos pontos de coleta de velocidade do ar (40% de rotação dos ventiladores):

Pilha 5			Pilha 4			Pilha 3			Pilha 2			Pilha 1			Médias
3,7	3,7	3,8	3,8	3,9	4,1	3,8	3,6	3,7	4,1	4,3	4,1	3,5	3,6	4,1	
4,3	4,0	4,2	3,6	3,7	4,1	3,9	3,9	4,0	4,1	4,0	3,8	3,8	3,9	3,7	
4,4	4,1	4,1	4,0	4,0	3,9	4,0	3,9	3,8	4,0	4,1	4,0	4,0	3,9	3,9	
4,1	3,9	4,0	3,8	3,9	4,0	3,9	3,8	3,8	4,1	4,1	4,0	3,8	3,8	3,9	3,9
3,9	3,9	3,6	3,7	3,8	4,1	4,1	4,1	4,0	3,9	3,7	4,1	4,1	3,9	3,7	
4,3	4,2	3,8	3,9	4,2	4,2	4,1	4,2	4,1	4,0	4,1	4,0	4,0	3,9	4,0	
4,0	3,8	4,0	4,1	4,1	4,0	4,2	3,7	3,8	3,9	4,0	4,0	3,9	3,8	3,9	
4,1	4,0	3,8	3,9	4,0	4,1	4,1	4,0	4,0	3,9	3,9	4,0	4,0	3,9	3,9	4,0
3,6	3,5	4,1	4,2	4,0	3,9	4,0	3,9	4,2	4,1	4,3	4,0	4,0	3,9	3,9	
3,7	4,2	4,1	3,9	3,9	4,1	4,1	3,9	3,9	3,6	3,7	3,8	4,1	4,1	4,1	
4,0	3,9	3,8	4,1	4,1	4,0	4,0	3,9	3,9	3,9	3,7	4,1	3,7	3,6	3,7	
3,8	3,9	4,0	4,1	4,0	4,0	4,0	3,9	4,0	3,9	3,9	4,0	3,9	3,9	3,9	3,9
3,8	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0	4,1	4,3	4,0	3,9	4,0	3,6	3,7	3,6	3,6	
4,0	4,1	4,1	4,2	4,0	4,1	3,9	4,0	4,1	4,0	4,1	4,1	4,0	4,0	3,6	
3,7	3,7	3,8	3,9	3,9	4,0	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0	3,9	3,8	3,7	3,8	
3,8	3,9	3,9	4,0	4,0	4,0	3,9	4,1	4,0	4,0	4,0	3,9	3,8	3,8	3,7	3,9
Média total 3,9															
Dumper															Dumper
dados coletados em km/h e com resultados apresentados em m/s.															

5.4. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E SEU CUSTO NO PROCESSO DE SECAGEM

O custo de secagem é relacionado com o número de ventiladores e sua potência efetiva e trabalho.

Para cálculo de potência efetiva de trabalho foi coletada a corrente elétrica dos ventiladores em percentuais de rotação dos motores desde 100% até 40%

O cálculo de potencia efetiva é feita com base na seguinte fórmula:

$$P = u \times i$$

Onde:

P = potencia

U = voltagem (380volts)

I = corrente elétrica

Foi coletada através de alicate, a corrente efetiva para cada variação de percentual de rotação, com estes valores foi possível calcular os valores de potencia efetiva, os valores são apresentados na tabela abaixo.

Para cálculo da corrente usou-se o valor estabelecido da voltagem que é de 380 volts.

TABELA 4 – Tabela contendo os valores de corrente e potencial efetivos, os valores estão expressos em kw.

Rotação (%)	Corrente (amperè)	Potência Efetiva (kw)	Potência Nominal (kw)	Potência base de Cálculo (kw)
100%	27,0	10,26	18,50	16,65
90%	26,5	10,07	16,65	14,99
80%	25,0	9,50	14,80	13,32
70%	23,6	8,97	12,95	11,66
60%	22,3	8,47	11,10	9,99
50%	21,3	8,09	9,25	8,33
40%	19,9	7,56	6,66	5,99
30%	19,0	7,22	4,44	4,00

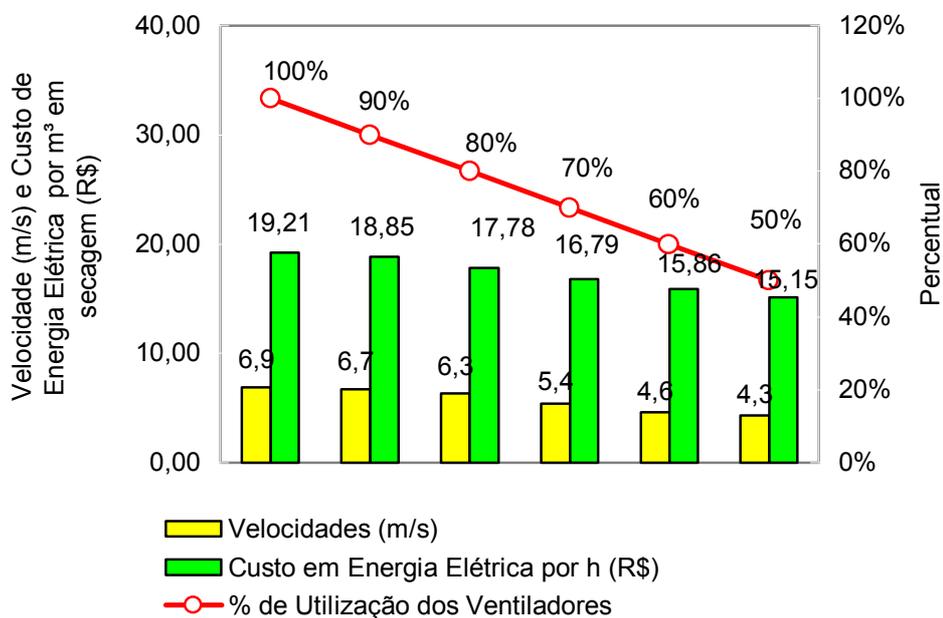
O custo de secagem, foi analisado a partir do valor do kwh cobrado pela fornecedora de energia e pela distribuidora, este custo não é fixo porém para base de cálculo podemos considerá-lo 0,26 centavos de real.

O custo foi levantado através da média de custo dos ultimo doze meses.

Tendo-se o custo do kw, podemos calcular o custo de secagem com energia elétrica por hora de processo com o uso dos inversores de freqüência em percentuais que variam entre 100% e 40%.

FIGURA 13 – Comparativa entre o custo de secagem, percentual de utilização dos ventiladores e velocidade de rotação.

Custo da Energia Elétrica comparado ao Percentual de Utilização e a Velocidade de Giro dos Ventiladores



3.5.1 AVALIAÇÃO DA SECAGEM

Analisada a economia com uso dos inversores de frequência torna-se necessário avaliar a qualidade da madeira após o processo de secagem. A avaliação consiste em três aspectos:

- Tempo de secagem, não é favorável o processo ser mais barato e ter um maior tempo de secagem;
- Índice de trincas, não é favorável o processo ser mais econômico e apresentar uns índices elevados de trincas, impossibilitando assim o processo da madeira;
- Tensão da madeira, a madeira deve possuir tensão estável e dentro do tolerável, (utilização do teste do garfo).

- Em relação ao teor de umidade a madeira não deverá sair da estufa enquanto o teor de umidade da carga não for o ideal para o processamento seguinte.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 TESTE DE USO DOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Os inversores foram testados por um período de 8 horas consecutivas e não apresentaram nenhuma falha operacional, foi revertido o lado de giro dos ventiladores a cada 3 horas e a cada reversão todos os ventiladores estavam girando para o mesmo lado.

Esta era uma das preocupações em relação ao uso dos inversores, já que em testes anteriores não foram todos os ventiladores que giravam para o mesmo lado.

6.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Foi levantado o consumo de energia elétrica do processo de secagem sem o uso dos inversores de frequência, após foi testado o mesmo programa porém fazendo-se o uso dos inversores de frequência, então foi comparado o custo de secagem.

O tempo de secagem foi conseguido através de uma tabela existente no setor de secagem.

O consumo de energia elétrica foi calculado através da multiplicação do tempo de secagem pela potência e pelo custo unitário de cada kw.

TABELA 5 – Custo da energia elétrica em função do percentual de rotação dos ventiladores.

Percentual de rotação (%)	Custo em R\$/h
100%	19,21
90%	18,85
80%	17,78
70%	16,79
60%	15,86
50%	15,15

40%	14,16
-----	-------

A economia é calculada então levando em consideração que os tempos de secagem não se alteram com ou sem o uso dos inversores de frequência.

Para cada situação de teste de uso dos inversores será apresentada uma tabela com o custo que teria a secagem se houvessem sido utilizados os inversores de frequência.

Situação um sem o uso dos inversores de frequência.

TABELA 6 – Condições do processo de secagem sem o uso dos inversores de frequência.

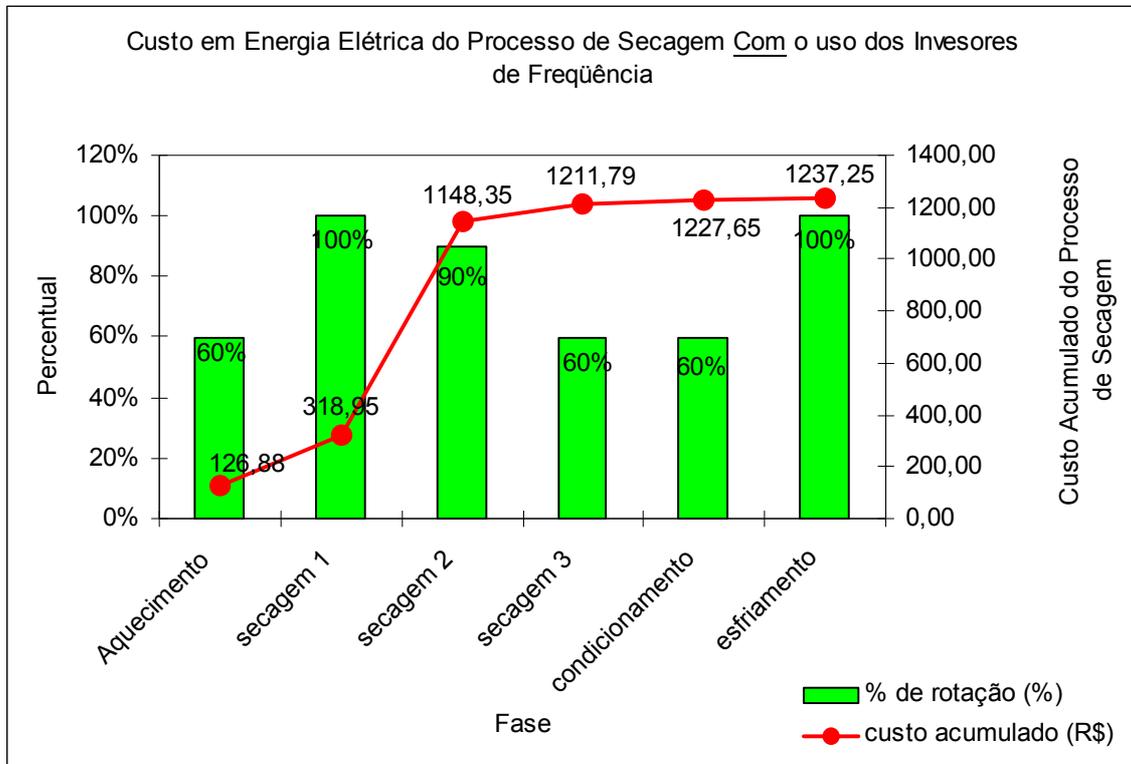
Fase	% de rotação (%)	Custo por hora (R\$/h)	Duração em horas (h)	custo total (R\$)	custo acumulado (R\$)
Aquecimento	100%	19,21	8	153,65	153,65
secagem 1	100%	19,21	10	192,07	345,72
secagem 2	100%	19,21	44	845,10	1190,82
secagem 3	100%	19,21	4	76,83	1267,64
condicionamento	100%	19,21	1	19,21	1286,85
esfriamento	100%	19,21	0,5	9,60	1296,45
Total em horas			67,5		
Custo Total	(R\$)			R\$ 1.296,45	reais

Situação um com o uso dos inversores de frequência.

TABELA 7 – Condições do processo de secagem com o uso dos inversores de frequência.

Fase	% de rotação (%)	Custo por hora (R\$/h)	Duração em horas (h)	custo total (R\$)	custo acumulado (R\$)
Aquecimento	60%	15,86	8	126,88	126,88
secagem 1	100%	19,21	10	192,07	318,95
secagem 2	90%	18,85	44	829,40	1148,35
secagem 3	60%	15,86	4	63,44	1211,79
condicionamento	60%	15,86	1	15,86	1227,65
esfriamento	100%	19,21	0,5	9,60	1237,25
Total em horas			67,5		
Custo Total	(R\$)			R\$ 1.237,25	reais

FIGURA 14 – Condições de secagem com o uso dos inversores de frequência.



Com está análise pode-se entender que se feito o uso dos inversores de frequência tem-se uma economia por ciclo de R\$ 59,20, sendo 7 ciclos por mês tem-se uma economia de R\$ 414,40 de economia mensal, e de economia anual terá-se R\$ 4.972,80 por estufa de secagem.

Se somarmos as duas estufas que possuem inversores de frequência instalados ter-se-á uma economia anual de R\$ 9.945,60.

Com relação à qualidade da madeira no processo com o uso dos inversores de frequência pode-se analisar que o tempo de secagem não aumentou o mesmo até diminuiu, as trincas permaneceram dentro do tolerável e numa média de 0,77% por carga (a análise de carga é feita sobre 100 peças, retiradas de pacotes aleatórios do processo) e o teste de tensão resultou leve ou moderado para toda a carga analisada.

Situação dois sem o uso dos inversores de frequência

TABELA 8 – Condições do processo de secagem sem o uso dos inversores de frequência.

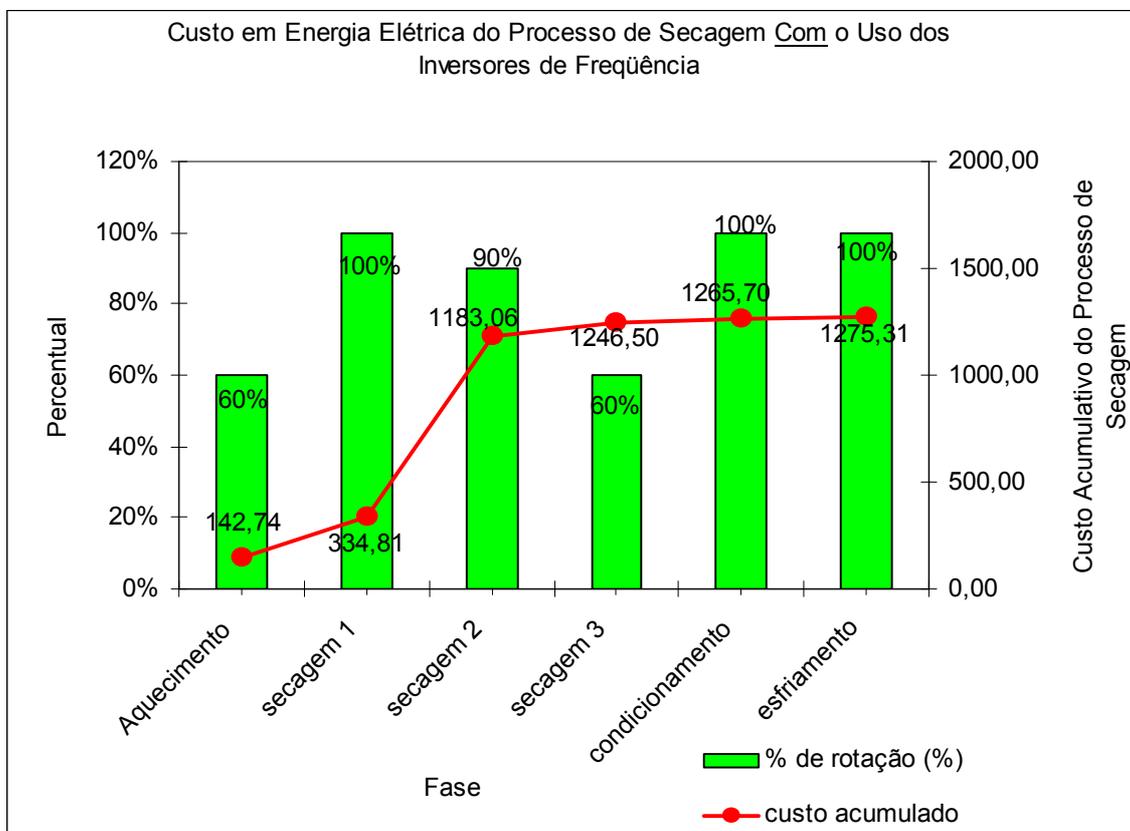
Fase	% de rotação (%)	Custo por hora (R\$/h)	Duração em horas (h)	custo total (R\$)	custo acumulado (R\$)
Aquecimento	100%	19,21	9	172,86	172,86
secagem 1	100%	19,21	10	192,07	364,93
secagem 2	100%	19,21	45	864,30	1229,23
secagem 3	100%	19,21	4	76,83	1306,06
condicionamento	100%	19,21	1	19,21	1325,26
esfriamento	100%	19,21	0,5	9,60	1334,87
Total em horas			69,5		
Custo Total	(R\$)			R\$ 1.334,87	reais

Situação dois com o uso dos inversores de frequência

TABELA 9 – Condições do processo de secagem com o uso dos inversores de frequência.

Fase	% de rotação (%)	Custo por hora (R\$/h)	Duração em horas (h)	custo total (R\$)	custo acumulado (R\$)
Aquecimento	60%	15,86	9	142,74	142,74
secagem 1	100%	19,21	10	192,07	334,81
secagem 2	90%	18,85	45	848,25	1183,06
secagem 3	60%	15,86	4	63,44	1246,50
condicionamento	100%	19,21	1	19,21	1265,70
esfriamento	100%	19,21	0,5	9,60	1275,31
Total em horas			69,5		
Custo Total	(R\$)			R\$ 1.275,31	reais

FIGURA 15 – Condições de secagem com o uso dos inversores de frequência.



Com esta análise pode-se entender que se feito o uso dos inversores de frequência tem-se uma economia por ciclo de R\$ 59,16, sendo 7 ciclos por mês tem-se uma economia de R\$ 414,12 de economia mensal, e de economia anual terá-se R\$ 4.969,44 por estufa de secagem.

Se somarmos as duas estufas que possuem inversores de frequência instalados ter-se-á uma economia anual de R\$ 9.938,88.

Com relação à qualidade da madeira no processo com o uso dos inversores pode-se analisar que o tempo de secagem não aumentou o mesmo até diminuiu, as trincas tiveram um resultado excelente 0,0% por carga (a análise de carga é feita sobre 100 peças, retiradas de pacotes aleatórios do processo) e o teste de tensão resultou leve ou moderado para toda a carga analisada.

Situação três sem o uso dos inversores de frequência

TABELA 10 – Condições do processo de secagem sem o uso dos inversores de frequência.

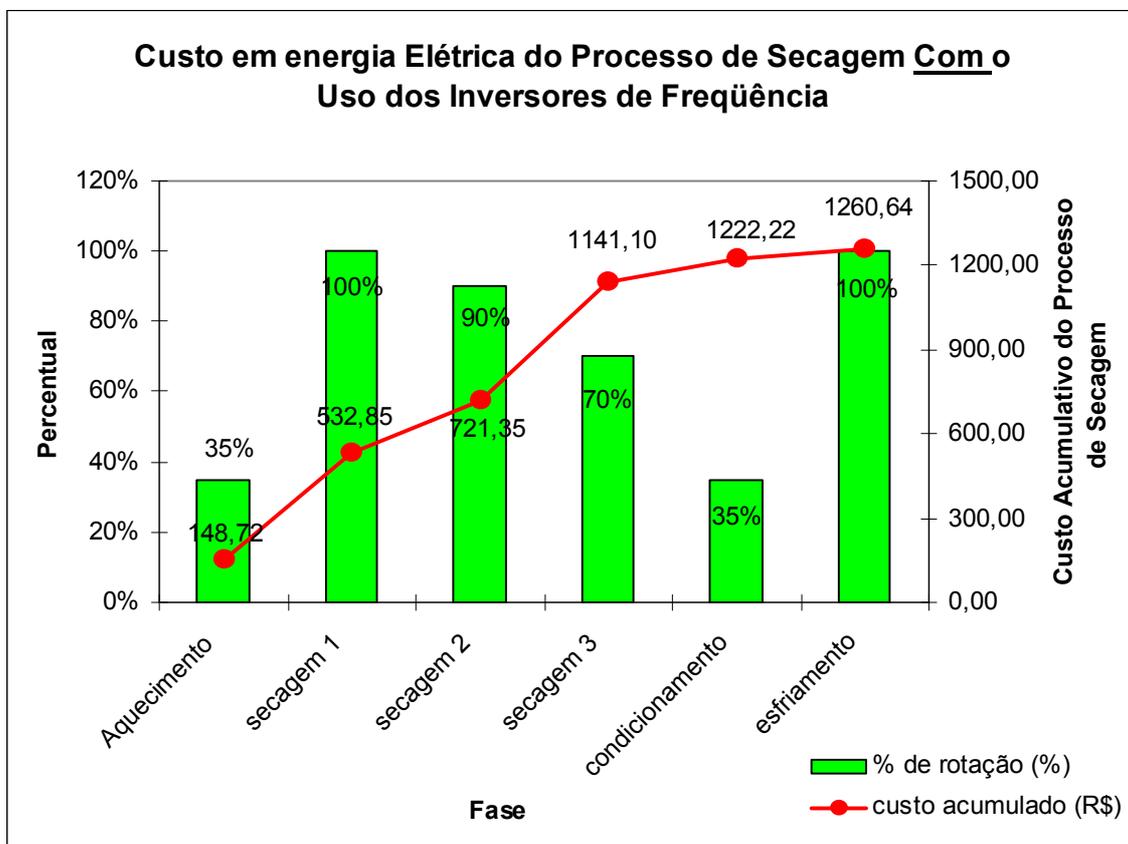
Fase	% de rotação (%)	Custo por hora (R\$/h)	Duração em horas (h)	custo total (R\$)	custo acumulado (R\$)
Aquecimento	100%	19,21	11	211,27	211,27
secagem 1	100%	19,21	20	384,13	595,41
secagem 2	100%	19,21	10	192,07	787,48
secagem 3	100%	19,21	25	480,17	1267,64
condicionamento	100%	19,21	6	115,24	1382,88
esfriamento	100%	19,21	2	38,41	1421,30
Total em horas			74		
Custo Total	(R\$)			R\$ 1.421,30	reais

Situação três com o uso dos inversores de frequência

TABELA 11 – Condições do processo de secagem com o uso dos inversores de frequência.

Fase	% de rotação (%)	Custo por hora (R\$/h)	Duração em horas (h)	custo total (R\$)	custo acumulado (R\$)
Aquecimento	35%	13,52	11	148,72	148,72
secagem 1	100%	19,21	20	384,13	532,85
secagem 2	90%	18,85	10	188,50	721,35
secagem 3	70%	16,79	25	419,75	1141,10
condicionamento	35%	13,52	6	81,12	1222,22
esfriamento	100%	19,21	2	38,41	1260,64
Total em horas			74		
Custo Total	(R\$)			R\$ 1.260,64	reais

FIGURA 16 – Condições de secagem com o uso dos inversores de frequência.



Com esta análise pode-se entender que se feito o uso dos inversores de frequência tem-se uma economia por ciclo de R\$ 160,66, sendo 7 ciclos por mês tem-se uma economia de R\$ 1.124,62 de economia mensal, e de economia anual terá-se R\$ 13.495,44 por estufa de secagem.

Se somarmos as duas estufas que possuem inversores de frequência instalados ter-se-á uma economia anual de R\$ 26.990,88.

Com relação à qualidade da madeira no processo com o uso dos inversores pode-se analisar que o tempo de secagem não aumentou o mesmo até diminuiu, as trincas permaneceram dentro do tolerável e numa média de 2,96% por carga (a análise de carga é feita sobre 100 peças, retiradas de pacotes aleatórios do processo) e o teste de tensão resultou leve ou moderado para toda a carga analisada.

7. CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os resultados obtidos, verificam-se vantagens econômicas e retorno financeiro imediato levando-se em consideração que o equipamento está instalado e foi adquirido juntamente com o equipamento de secagem, não necessitando investimento.

A economia com o uso dos inversores de frequência varia de acordo com o programa utilizado dependendo também da bitola a ser seca, o estudo foi feito com relação à secagem da bitola 0,37 x 0,91 x 4,00 m.

A bitola foi escolhida devido a sua maior produção.

O uso dos inversores de frequência foi testado também em outras bitolas aleatórias, em nenhum dos testes apresentou-se problemas.

Os testes foram realizados com uma moderada redução da rotação dos ventiladores, visto que as velocidades de ar nas estufas Mahild são maiores, ainda é possível ajustar de forma mais precisa os percentuais de rotação dos ventiladores.

A intenção do estudo era provar a economia gerada com o uso dos inversores de frequência, estando provado, toda e qualquer redução maior que as testadas desde que não causem problemas de qualidade são validas e recomendadas.

Algumas recomendações, porém devem ser analisados, segundo (Pezo, José, 2007, pág.13), não se devem reduzir as velocidades de rotação dos ventiladores a uma velocidade inferior a 2,5m/s, pois abaixo desta velocidade não se tem leitura do termômetro de bulbo úmido (TBU).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS,

JANKOWSKY, Ivaldo Pontes. Gradiente de Umidade e Desenvolvimento de Tensões da Secagem Artificial. IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba SP, 1983. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia>

KLITZKE, Ricardo Jorge. Apostila de Secagem, UFPR – Universidade Federal do Paraná, PR 2002.

FERNÁNDEZ, Juan Ignacio; MONTES; NOVES, Humberto Alvarez. Manual do Secado de Madeiras. Chile Gráfica Palermo, 1998. 169 páginas.

GALVÃO, Antonio Paulo de Mendes; JANKOWSKY, Ivaldo Pontes. Secagem Racional da Madeira. São Paulo, Editora Nobel, 1985. 111 páginas.

TOMASELLI, Ivan; KLITZKE, RICARDO Jorge. Secagem da Madeira. UnC – Universidade do Contestado Canoinhas, 2000. 90 páginas.

PEZO, Jose. Curso de Secagem. Mahild, 2007.

PONCE, Reinaldo Herrero; WATAI, Luiz Tadashi. Manual de Secagem da Madeira Brasília, IPT, 1985. 70 páginas

RODRIGUES, Waldemir; SALES, Almir. Determinação do Teor de Umidade em Madeiras por Meio de Medidores Elétricos. CAPES – Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. São Marcos SP – USP São Carlos, 1999.

HIDELBRAND. 1970. disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia>

FERNANDES E GALVÃO. 1978 / 1979. Disponível em:
<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia>

SEVERO, E. T. D. Efeito da Temperatura e da Velocidade do Ar na Secagem de Madeira Serrada de *Pinus elliottii*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 1986. 109p.

KOCH, P. Process for straightening and drying southern pine 2 by 4's in 24 hour. For. Prod. J. 21 (5): 17-24, 1971.

KOCH, P. Utilization of southern pines. Washington, USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1972. 2 v. (Agriculture Handbook, n. 420).

SILVA, D.A. Avaliação da eficiência energética de uma indústria de painéis compensados – Tese de Doutorado em Ciências Florestais, apresentada para a UFPR, 204p., 2001.

TOMASELLI, I. Aspectos físicos da secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. Acima de 100o C. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 128p. 1981. (Tese para Professor Titular).

CORDER, E. S. Potential for energy recovery from lumber dry kilns. Forestry Products Journal, vol. 30, n. 8, 1980.

COMSTOCK, G.L. Energy requirements for drying of wood products. Madison, Proceedings Wood Residue as an Energy Source. Forest Products Research Society, 1975.

WENGERT, E.M. & DENIG, J. Lumber drying – today and tomorrow. For Prod. J., Madison, v. 45, n. 5, p. 22-30, May 1995.

CHEN, Z.; WENGERT, E.M.; LAMB, F.M. A technique to electrically measure the moisture content of wood above fiber saturation. Forest products journal, v.44, n.9, p.57-62, 1994.

BRUNNER R. & HILDBRAND, R. Die Schitthoizarocknung. 5 Auflage, Hannover, república Federal Alemana, 1987.

SIMPSON W. T. Effect of air velocity on the drying rate of single eastern white pine boards. USDA Forest Service, Research Note FPL-RN-266, 5p., sep. 1997.

GARRAHAN, P. Taking the air of Kiln Drying costs. Can. Wood Prod. , Montreal: p.24- 25, 1993.

SANTINI E. J. Alternativas para Monitoramento e Controle do Processo de Secagem de Madeira Serrada em Estufa. Curitiba, 1996. 203 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná.

KOLLMANN, F.F.P & SHENEIDER, A. Der eiflub der Stromungsgesswindigkeit aufdie Heibdampftrocknung von Shnittholz. Holz als Rohn-und Werkstoff, 19: 461- 478. 1961.

VRANIZAN, J.M. & WOHLGEMUTH, C.W. Conserving electricity in lumber dry kilns. For. Ind., San Francisco, v. 115, n. 7, p. T28-T30, July1988.

SIEMENS Simovert Masterdrivers – Engineering Manual for Drive Converters, 1999.

YAKSIC Revista Controle & Instrumentação Edição no56, março 2001
Disponível em <WWW.controleinstrumentação.com.br> acesso 10 de dezembro de 2001.

CULPEPPER, L. HighTemperature Drying Enhancing Kiln Operations. Miller
Freem Publications, Inc. San francisco, Ca. USA, 1990.

SCHMITZ Revista Controle & Instrumentação Edição no56, março 2001
Disponível em <WWW.controleinstrumentação.com.br >

DEL MONTE, F.F. Motores Assíncronos com Frequência Variável. Mundo
Elétrico, 56p.,1980.

LOBOSCO O. S. & DIAS. J.L. da C. Seleção e aplicação de motores
elétricos. Série Brasileira de Tecnologia, v. 2, 512p., 1988

RAYMOND Revista Controle & Instrumentação Edição no56, março 2001
Disponível em <WWW.controleinstrumentação.com.br >