



**I SEAFLORE - Semana de
Aperfeiçoamento em
Engenharia Florestal**



EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO PROCESSO DE SECAGEM DA MADEIRA NA INDÚSTRIA

Elisa PizzaiaGoltz

Linéia Roberta Zen

Curitiba

2017

1. VARIÁVEIS AMBIENTAIS NO PROCESSO 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, 2007).

1.1 Temperatura

O calor é a fonte da qual as moléculas de água na madeira adquirem a energia cinética necessária para provocar a evaporação. A temperatura também influencia a umidade relativa do ar, aumentando a pressão de saturação do vapor de água, ou seja, aumentando a capacidade do ar em receber água evaporada na madeira (RASMUSSEN, 1961; HILDEBRAND, 1970). 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 (KLITZKE, 2007).

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

Em estufa a energia fornecida é por convecção, enquanto que na secagem ao ar livre a energia é fornecida por radiação direta do sol, elevando a temperatura da superfície da peça de madeira gerando defeitos (empenamentos e rachaduras), devido o gradiente de umidade gerado e pela constante variação de contração e inchamento da peça de madeira. 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 (KLITZKE, 2007).

O controle da temperatura para muitas espécies é o fator de maior influência no processo de secagem. 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 chegar a uma temperatura de 120 °C. Para madeira de peso médio 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 temperaturas acima de 60°C, devidas reações químicas ocorridas com a lignina e as polioses. A temperatura é medida em estufa por meio de um termômetro de bulbo seco (TBS), do psicrômetro em °C (KLITZKE, 2007).

1.2 Características do ar

O ar tem peso e, portanto, exerce uma pressão sobre a superfície terrestre. Se pesar uma coluna de ar de um centímetro quadrado de seção que se estenda desde da superfície da terra até o limite exterior da atmosfera, se encontraria um peso de 1033kg ou seja 1033kg/cm² sobre a superfície da terra. Esta é uma pressão equivalente a de uma coluna de 76cm de mercúrio (HG) ou de uma coluna de água de 10,33m. O ar contém vários gases entre eles temos: Nitrogênio (N₂), Oxigênio (O₂), e outros. Entre os outros gases temos o vapor d'água (KLITZKE, 2007).

A pressão de vapor d'água em determinado ambiente, determina o movimento da umidade e portanto a velocidade de secagem da madeira. Nem todas as moléculas têm a mesma velocidade algumas se movem mais rápidas outras mais lentas. Quando as moléculas com alta velocidade alcançam a superfície da madeira, sua energia cinética alcançada lhe permite vencer a força de tração da molécula escapando do líquido na forma de vapor. Retornando a forma líquida ao encontrar com a superfície do líquido (condensação) (KLITZKE, 2007).

- Pressão Parcial de Vapor (P)

É a quantidade de vapor d'água medida de um determinado ambiente a uma dada temperatura. A pressão parcial de vapor pode variar de zero, em ar completamente seco, até a ambiente completamente saturado com 100% de umidade relativa.

- Pressão de Vapor Saturado (PO)

A pressão de vapor d'água saturado (Po) é a quantidade máxima de um determinado ambiente em absorver moléculas d'água a uma dada temperatura. Quando a pressão de vapor saturada for igual a pressão de vapor parcial a umidade relativa será igual a 100%.

1.3 Umidade relativa

Com o aumento da temperatura sem adição de umidade, ocorre uma diminuição da umidade relativa do ar porque aumenta a capacidade de ar em reter umidade. Entre a umidade relativa do ar e a temperatura, se estabelece um equilíbrio higroscópico de grande importância para a secagem da madeira, uma vez que através desta relação pode-se controlar e regular o processo de secagem. Aumentando-se a temperatura do ar numa câmara de secagem, a umidade de equilíbrio é reduzida, obtendo-se com isso uma redução do teor de umidade da madeira. Para que a umidade relativa do ar seja mantida constante durante o processo de secagem, é preciso haver uma troca de ar úmido do ambiente de secagem por ar fresco (HILDEBRAND, 1964).

A umidade relativa do ar é a relação existente entre o total de vapor d'água presente no ar e a quantidade máxima de vapor que o ar poderia absorver a uma mesma temperatura e pressão. Portanto, a velocidade na qual se efetua a evaporação da água na superfície de uma peça de madeira é em grande parte, em função da umidade relativa do ar que está em contato com a madeira (KOLLMANN E CÔTE, 1968).

A medição da umidade relativa é realizada pelo higrômetro (em laboratórios) para condições naturais e para temperaturas inferiores a 50°C a medição se baseia no cabelo humano. Quando o cabelo se alonga a umidade relativa do ar é alta e quando se contrai a umidade relativa é baixa. A contração e o alongamento do cabelo é transmitido a uma agulha que indica o valor correspondente da umidade relativa do ar no instante medido (KLITZKE, 2007).

Outra forma de medir a umidade relativa é por meio do psicrômetro (TBS /TBU), utilizado nas câmaras de secagem. Consiste de dois termômetros idênticos (PT100) sendo que, um deles o bulbo permanece livre (TBS), medindo a temperatura do ambiente. O outro termômetro, chamado de termômetro de bulbo 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 (KLITZKE, 2007).

- Deve-se utilizar sempre água destilada ou da chuva;
- Deve-se evitar incrustações as quais impedem a evaporação da água alterando a leitura do TBU;
- Se a água flui muito rapidamente pelo bulbo ocorre um resfriamento exagerado do termômetro, ocasionando erro de leitura.

A diferença entre o TBS e o TBU irá ocorrer devido ao resfriamento causado pela evaporação de parte da água contida na tela, medindo a temperatura ambiente menos a perda de calor causado pela evaporação. A diferença entre as temperaturas medidas no TBS e no TBU são entradas em uma tabela, obtendo-se desta forma a umidade relativa correspondente no instante medido. 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% ($P = P_o$).

O controle da umidade relativa dentro da câmara de secagem é obtida através de:

- Injeção de vapor vivo;
- Utilização de uma tina para promover o aumento da umidade relativa;
- Controlando as entradas e saídas de ar (umidade relativa alta – abrindo, e umidade relativa baixa – fechando).

1.4 Velocidade do ar

Conforme Klitzke (2007), a velocidade do ar controla a evaporação da água no processo de secagem, a circulação de ar fresco através da pilha expulsa a umidade da superfície da madeira. Suas funções principais são:

- Transmitir energia necessária para aquecer a água contida na madeira facilitando a sua evaporação.
- Transportar a umidade retirada da madeira.

A camada de ar estagnante na superfície da madeira sempre irá existir, esta camada reduz a eficiência na transferência de calor na superfície da madeira. Quanto menor a espessura da camada mais rápida será a remoção da umidade da superfície da madeira. Uma corrente de ar turbulento é muito mais eficaz do que uma corrente de ar laminar, pois reduz a espessura da camada de ar estagnante podendo desta forma obter maior eficiência na transferência de calor para a superfície da madeira. A velocidade do ar é muito importante nas primeiras etapas da secagem artificial (forçada em câmara), ela reduz o tempo quando bem explorada. Velocidades do ar maiores devem ser aplicadas no início da secagem se for possível (KLITZKE, 2007).

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

De acordo com FRICKE (1968), o uso de altas velocidades do ar é vantajoso para madeiras finas, com elevado teor de umidade inicial e de fácil secagem, pilhas largas e quando se deseja uniformidade de secagem. Em contrapartida, baixas

velocidades são mais adequadas para madeiras espessas, parcialmente secas e pilhas estreitas. O aumento da velocidade do ar reduz o gradiente de temperatura entre as pilhas de madeira, resultando numa secagem mais rápida e homogênea.

1.5 Umidade de equilíbrio

A madeira é um material higroscópico, isto é, possui a capacidade de tomar ou ceder umidade em forma de vapor. Quando úmida, perde moléculas de vapor d'água para a atmosfera e quando seca, pode absorver vapor d'água do meio. Existe um momento em que a madeira deixa de ganhar ou de perder moléculas d'água, este momento é chamado de equilíbrio higroscópico da madeira (KLITZKE,2007).

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. Ela varia de espécie para espécie (KLITZKE,2007).

A umidade de equilíbrio é obtida em função da umidade relativa e da temperatura. Para determinar a umidade de equilíbrio utilizam-se tabelas (U.S.D.A. *Forest Service*). A umidade de equilíbrio é fundamental para a condução da secagem artificial, ela é afetada pela umidade relativa do ambiente, pela temperatura sofrendo influência da espécie, do teor de extrativos da porcentagem de cerne e alburno de uma mesma espécie. A temperatura diminui a umidade de equilíbrio da madeira para uma considerada umidade relativa. A seguir será apresentada na Figura 1 a umidade de equilíbrio de algumas cidades brasileiras (KLITZKE,2007).

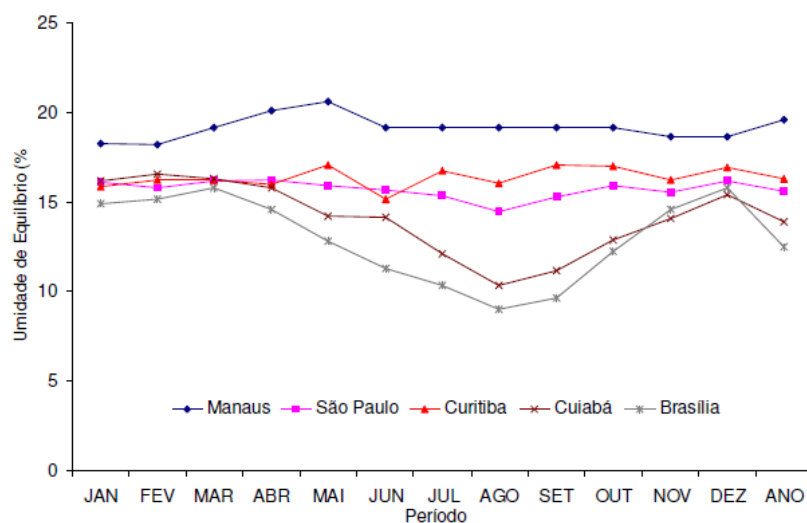


Figura 1- Umidade de Equilíbrio em diferentes regiões e épocas do ano.
Fonte: KLITZKE, 2007.

Em secagem natural, a madeira irá secar até a umidade de equilíbrio da região, nunca abaixo da mesma. Em uma região seca e quente, a madeira apresentará uma umidade de equilíbrio menor que o encontrado em uma região fria e úmida. Secando madeira ao ar livre, o tempo requerido para alcançar a umidade de equilíbrio é muito longo (meses) e, portanto em muitas ocasiões é aconselhado recorrer a secagem artificial para reduzi-lo (KLITZKE,2007).

A madeira quando sofre um processo de beneficiamento normalmente deve conter um teor umidade recomendado dependendo do uso final. Muitas vezes este teor de umidade está abaixo da umidade de equilíbrio obtida na secagem natural,

sendo necessário introduzir condições climáticas especiais que permitam que a madeira alcance o teor de umidade de equilíbrio desejado, somente alcançado por meio da secagem artificial em câmaras especiais (KLITZKE,2007).

1.6 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 comece 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 um resultado do movimento da umidade desde o interior até a superfície, onde se evapora e escapa para a atmosfera circundante (KLITZKE,2007).

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 o GU, quer dizer eu quanto maior a diferença entre o teor de umidade da superfície do centro, mais rapidamente secará a madeira e inversamente, se o gradiente for baixo, o tempo de secagem aumentará causando um aumento nos custos de secagem(KLITZKE,2007).

Na secagem artificial da madeira é importante estabelecer um GU ótimo que determina o tempo de secagem sem ocorrer riscos de ocasionar danos a madeira. Elevado GU causa um conteúdo de umidade abaixo do **PSF** nas partes externas da peça de madeira, as quais, ficam impedidas de contrair porque as capas internas ainda contêm muita água livre (acima do **PSF**), gerando tensões na madeira que podem ocasionar deformações, podendo 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, causar rachaduras internas ou de superfície, etc. Na secagem natural não tem condições de controlar o GU da peça de madeira(KLITZKE,2007).

1.7 Taxa de secagem

A taxa de secagem ou velocidade de secagem refere-se à quantidade de umidade evaporada, em certo intervalo de tempo, em relação à área de evaporação da peça de madeira. Com as informações fornecidas pode-se estimar o tempo de secagem de uma determinada espécie, da condição de madeira verde até um teor de umidade considerado a uma dada temperatura e umidade de equilíbrio (KLITZKE; BATISTA, 2010). A saída mais ou menos rápida da água por unidade de tempo é influenciada pela velocidade do ar, temperatura da madeira e umidade relativa do ar (HERZBERG et al., 1985). Kollmann e Côté (1968) relatam que a estrutura anatômica, a densidade, a espessura das tábuas e o conteúdo de umidade são características que também afetam a taxa de secagem.

SALOMON (1973) estudando programa de secagem concluiu que durante os estágios iniciais da secagem altas velocidades do ar são necessárias e que baixas velocidades podem ser utilizadas abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) ou aumentando a temperatura ou fazendo combinações entre ambos, com isso, aumentou a taxa de secagem dias vezes acima do que as dos programas convencionais, sem causar perda de qualidade a madeira em câmara experimental.

Segundo TOMASELLI (1981), a velocidade de secagem dependerá no primeiro estágio da diferença entre a temperatura da superfície da madeira e a do ar circulante, da umidade relativa do ar, porque o ar saturado apresenta maior coeficiente de condutibilidade térmica e da velocidade do ar, pois com o aumento da velocidade do ar

o fluxo passa de laminar para turbulento diminuindo o filme de ar estagnante sobre a madeira.

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

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

2 CONSUMO DE ENERGIA NA SECAGEM DA MADEIRA

2.1 Energia térmica

Com a crescente crise energética é necessário cada vez mais buscar alternativas que visem a redução do consumo de energia (SEVERO, 1986). Dentro deste contexto, a indústria de processamento e transformação da madeira juntamente com a secagem é que tem a maior participação nos gastos energéticos, chegando em 50% ou mais dos custos de produção. Dessa forma, técnicas de conservação de energia são medidas que devem ser adotadas para compensar os altos custos do processo de secagem, o que pode ser realizado com sistemas de controle eficientes.

O consumo de energia em uma estufa para madeira serrada pode ser dividido em três grupos distintos: aquecimento, vaporização e circulação do ar. O aquecimento para é responsável por cerca de 80% do consumo total de energia na secagem convencional (KOCH, 1971).

A energia consumida no processo de secagem da madeira é utilizada em duas formas, em energia elétrica e energia térmica. A energia térmica para aquecer todo o sistema, já a energia elétrica é utilizada para circulação do ar dentro da câmara. A energia térmica é consumida para aquecimento do ar no interior da câmara, aquecimento de toda estrutura da câmara, aquecimento do ar introduzido pelo sistema de renovação do ar e a energia térmica é consumida para repor perdas do sistema, como: paredes, tetos e portas (KLITZKE, 2002).

Corriqueiramente, a geração da energia térmica (vapor) é a principal requerente de resíduos pela indústria madeireira. A geração de energia térmica através desses resíduos é maior que a demanda, ocasionalmente tem-se um excedente de energia. Baseado nisso a adoção de sistemas de cogeração de energia (elétrica e térmica) através do aproveitamento dos resíduos gerados pela indústria madeireira tem se tornado um negócio altamente atrativo (LOPES & WIPIESKI, 2001).

2.2 Energia elétrica

A energia elétrica demandada na indústria de base florestal pode ser provida de duas distintas maneiras: aquisição direta de empresas produtoras de energia, como as concessionárias do setor elétrico ou através de produção própria. A primeira tem sido preferida nas regiões onde há fornecimento em tempo integral. Já a segunda maneira é uma saída para indústrias instaladas em regiões que apresentam

problemas de fornecimento elétrico em rede, como é o caso de certas localidades mais distantes e isoladas. Neste caso, tem-se, como exemplo, determinados pontos da Amazônia, em que o industrial produz a energia elétrica para atender sua própria demanda (SILVA, 2001).

Comstock (1975) estimou que na secagem o consumo de energia é 60 a 70% de toda energia gasta na produção de madeira manufaturada. Assim, uma pequena economia de energia na secagem da madeira significa grandes economias no uso total da energia.

Devido as 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 50% na energia (SIMPSON, 1997).

Kollmann&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 ao 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.

2.3 Uso do inversor de frequência na secagem da madeira

Antigamente os motores giravam em somente uma velocidade a só uma frequência, com o avanço da eletrônica tornou-se possível o uso de uma frequência variável para os motores, fator esse que deu origem aos denominados 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 inversor de frequência. É um mercado em plena expansão no Brasil. A maioria dos grandes fabricantes já está presente no país. O preço dos inversores hoje caiu bastante tornando-se acessível para vários segmentos da indústria.

Existem algumas formas para diminuir a rotação de um motor. Uma delas se dá alterando o diâmetro de sua polia, fator que não gera economia de energia elétrica. Outra forma que reduz o consumo de energia é a instalação de um inversor de frequência. Através do inversor de frequência pode-se fazer com que o motor trabalhe em qualquer rotação desejada durante o processo de secagem, diminuindo o consumo de energia elétrica quando diminuído a rotação, pois, a mesma é reduzida variando-se a frequência dos motores (Gontijo & Miranda, 2012).

Na utilização no processo de secagem da madeira, diminui-se a rotação e consequentemente a velocidade do ar conforme programado, tornando possível reduzir o consumo de energia elétrica ao decorrer do processo de secagem (Gontijo & Miranda, 2012).

Assim, pode-se propor o uso de sistemas de controle computadorizados para acompanhar a umidade da madeira podendo detectar o PSF com precisão e reduzir a velocidade do ar automaticamente.

O uso desses inversores proporciona uma variação o fluxo de ar em função da energia fornecida ao motor, num processo de circulação do vapor meio de ventiladores (Figura 2). A curva apresenta duas condições, quando for aplicada a plena carga do motor o consumo de energia sempre será constante. Enquanto que, quando for aplicada variação no fluxo de ar será obtida uma redução de consumo de energia.

Pode-se observar que com uma pequena redução no fluxo de ar ocorre uma redução no consumo de energia elétrica bastante significativa.

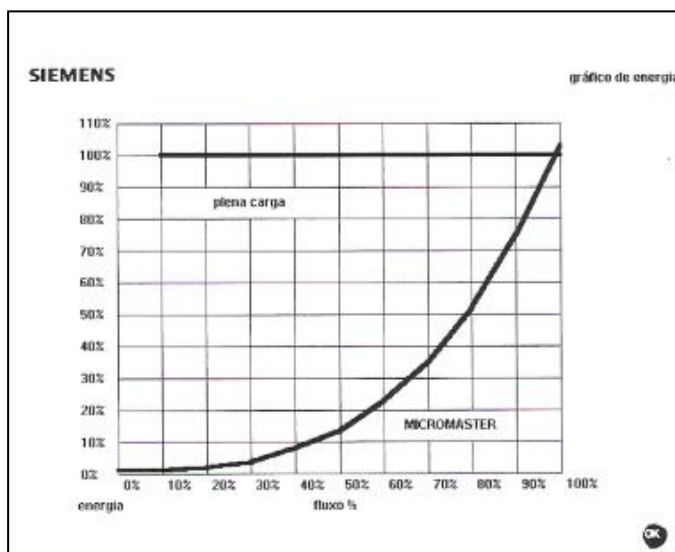


Figura 2 -Curva de energia consumida em função variação do fluxo ar.

Fonte: SIEMENS (1998).

Klitzke (2002) também comenta Cullper (1990), afirmando que a redução da vazão de ar abaixo PSF reduz os custos de energia elétrica em até 50%. Essa afirmação se baseia no fato de que ao chegar no PSF, o processo de secagem é mais rápido e requer menos ventilação. Essas baixas velocidades de ar removerão a umidade na superfície sem afetar a taxa de secagem.

Assim, pode-se propor o uso de sistemas de controle computadorizados para acompanhar a umidade da madeira podendo detectar o PSF com precisão e reduzir a velocidade do ar automaticamente.

Além desses, outros benefícios são apresentados:

- ☐ Possibilidade de maximizar a vazão de ar controlando no motor uma amperagem constante;
- ☐ Possibilidade de reduzir a vazão de ar suficiente para a secagem da madeira;
- ☐ O motor pode ser usado na reversão do fluxo de ar, parando os ventiladores lentamente em cascata e revertendo o fluxo da mesma forma, eliminando os picos de energia na linha.
- ☐ Gera economia de manutenção e vida econômica do equipamento, ao diminuir a tendência de queima do motor (enrolamento), quebra do eixo, substituição dos mancais etc.

3 ANÁLISE ECONÔMICA DE PROJETOS

A análise econômica permite ajudar na tomada de decisões, fixação de preços e determinação das escolhas entre as soluções alternativas sobre a produção ou novas implantações. Os custos de produção possuem grande peso em uma organização visto que nesses custos há vários fatores passíveis de controle, determinantes na composição do preço de venda do produto (Bonduelle, 1997).

Em termos gerais, projeto é um estudo que avalia aspectos técnicos, econômicos, financeiros e sociais da consequência da tomada de uma determinada decisão. Estas decisões envolvem a utilização de recursos que são despendidos para criar benefícios por um determinado período de tempo (LEONE, 1989).

Existem vários métodos para avaliação econômica de projetos, sendo divididos em duas categorias, segundo a consideração ou não da dimensão tempo sobre os valores monetários (KASSAI et al, 2000).

Os dois primeiros, período de Recuperação do Capital (*Pay-back*) e Retorno Sobre o Investimento não consideram o tempo. Já o Valor Líquido Presente (VLP), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Relação Benefício Custo (B/C) pertencem a segunda categoria (KASSAI et al, 2000).

O *payback* é um dos métodos mais simples e, talvez por isso, de utilização muito difundida. Consiste, essencialmente, em determinar o número de períodos necessários para recuperar o capital investido. Tendo essa avaliação, a administração da empresa, com base em seus padrões de tempo para recuperação do investimento, no tempo de vida esperado do ativo, nos riscos associados e em sua posição financeira, decide pela aceitação ou rejeição do projeto. A forma mais fácil de calculá-lo é simplesmente acumulando as entradas e saídas e determinando o período em que houve a transição de um valor positivo para negativo (RODRIGUES; ROZENFELD, 2008).

O método determinado Valor Líquido Presente origina a análise de investimentos que determina o valor presente de pagamentos futuros. Este método consiste em uma fórmula matemático-financeira em que o valor dos investimentos e do fluxo de caixa atual e futuro são convertidos para um valor equivalente na data atual por meio de uma taxa de conversão. Esta conversão é devido ao fato do poder aquisitivo do dinheiro sofrer alterações com o passar do tempo. A taxa de conversão utilizada neste método é a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) (RODRIGUES; ROZENFELD, 2008).

Já o método denominado Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma taxa de desconto para a qual o VLP dos benefícios é igual ao VLP dos custos. Ela representa a eficiência marginal do capital e corresponde a taxa de lucratividade esperada em projetos de investimento (HIRSCHFELD, 1998). Esta variação é consequência do volume de investimentos iniciais e do fluxo de retorno de cada projeto. A regra de decisão indica que somente se fará o investimento se a TIR for maior que a taxa de juros no mercado financeiro. Quanto maior a TIR mais desejável o investimento.

4 MÉTODOS USUAIS NA SECAGEM DA MADEIRA

4.1 Secagem ao Ar livre

Segundo Ponce e Watai (1985) o principal objetivo de secar a madeira ao ar livre é fazer com que esta perca a maior quantidade de água possível, utilizando as forças da natureza, onde muitas vezes esse método é usado como uma secagem parcial, mas também como uma secagem completa, dependendo do seu uso final.

A secagem ao ar livre consiste em gradear a madeira serrada em pátios, deixando a madeira secar naturalmente ao ar, de um determinado local, permitindo secar normalmente até que ela atinja a umidade de equilíbrio do ambiente. A taxa de secagem, ou seja, a velocidade com que a madeira seca depende, principalmente, da temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento (STANGERLIN, 2009).

Para que esse processo de secagem ao ar livre seja eficiente, são necessários alguns cuidados especiais, iniciando com a disposição adequada das pilhas no pátio, que devem estar 50 cm acima do solo e este solo deve possuir uma cobertura escura para maior retenção de energia ou se for um pátio gramado, a grama deve ser mantida sempre aparada (ROSSO, 2006). Ainda conforme a mesmOs autores outro fator preponderante é a direção dos ventos, onde as pilhas devem estar orientadas conforme a direção predominante dos ventos, pois o *layout* correto no pátio permitirá que a passagem de ar entre as peças seja uniforme.

Devido os fatores ambientais não serem controláveis, esta é a grande desvantagem do processo de secagem ao ar livre. Apesar disso, pode-se interferir sobre o processo, manipulando fatores como a largura da pilha, espessura dos sarrafos separadores, a ocupação horizontal das pilhas e o arranjo físico no pátio de secagem (GOMIDE, 1974; JANKOWSKY, 1992).

Conforme Santini (1992), as limitações da secagem ao ar livre estão geralmente associadas à sua dependência das condições atmosféricas. Particularmente na Região Sul do País, o processo é mais favorável no período da primavera/verão, quando a temperatura e insolação são mais intensas, e observa-se uma menor umidade relativa e precipitação.

Assim a secagem ao ar livre pode ser utilizada como secagem definitiva ou como uma pré-secagem, onde o conhecimento da umidade de equilíbrio da madeira na localidade, se torna parâmetro decisivo para determinar o ponto final da secagem (MENDES et al., 2000). Ainda conforme o mesmo autor, o que se observa é que a umidade de equilíbrio da madeira é uma ferramenta de suma importância no controle do processo de secagem da madeira ao ar livre. Recomenda ainda, se possível, uma análise dos dados de umidade de equilíbrio específica para o local de secagem de cada localidade.

4.2 Secagem Convencional

A secagem convencional sofre influências da madeira, das variáveis do processo em si, ou seja, temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e também da prévia preparação da madeira (ANDRADE, 2000) e é conduzida em câmaras de secagem, onde se opera com total controle da circulação do ar, da temperatura e da umidade relativa.

A secagem em câmara convencional é conduzida em um ambiente fechado onde o ar circula pela superfície da madeira e as temperaturas na câmara no início do processo variam entre 40 a 80°C e as temperaturas no final do ciclo, de 65 a 95°C (PONCE; WATAI, 1985). Também conforme Pratt (1974) a secagem convencional é conduzida com total controle das condições internas das mesmas. As estufas de

secagem convencionais são dotadas de um sistema de aquecimento, um sistema de umidificação do ar, um conjunto de “*dampers*” ou janelas, que permitem a troca de ar entre o interior da estufa e o meio externo, e um sistema de ventilação, que promove a circulação do ar através das pilhas de madeira.

O sistema de ventilação atua com duplo propósito: conduzir o calor seja dos elementos do irradiador, das serpentinas ou de outros tipos de aquecimento, à pilha de madeira e, também remover a umidade que vai evaporando e acumulando à superfície das tábuas, permitindo a sua substituição por nova massa de ar mais seco (MELO, 1999).

A circulação do ar, dependendo do tipo de câmara, é obtida naturalmente ou por meio de circuladores acionados eletricamente. Nesta última, as velocidades variam de 0,35 a 2 m/s, considerando-se as velocidades em torno de 2 m/s como as mais econômicas e efetivas. Velocidades maiores somente deveriam ser aplicadas para umidades iniciais elevadas (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A umidade relativa está diretamente relacionada com a capacidade do ar em receber maior ou menor quantidade de vapor de água e com a remoção da água das superfícies da madeira. O controle da umidade relativa é obtido por quatro diferentes maneiras: pelo sistema de aquecimento, através do fornecimento de vapor, pela admissão de ar mais seco e frio do exterior e pela eliminação de ar úmido do interior do secador. Estas três últimas regulagens permitem ajustar principalmente o termômetro úmido, enquanto a primeira controla o termômetro seco (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

Santos (2002) afirma que o processo de secagem convencional possui vantagens sobre o método de secagem ao ar livre, no entanto, não pode ser indicado para qualquer espécie, sendo necessário realizar uma adequação do processo dependendo da espécie, da espessura e do uso destinado para este material. O autor ainda cita que o principal objetivo da secagem artificial é promover o equilíbrio entre a velocidade de evaporação da água na superfície da madeira, a taxa de movimentação interna (tanto de calor como de umidade) e as reações da madeira durante o processo, tornando a secagem mais rápida possível e com um nível de perdas ou um padrão de qualidade aceitável para o produto que se pretende.

Em relação ao material, as madeiras mais densas e as peças com maior espessura, requerem mais tempo para secar. De acordo com Martins (1998), a massa específica está relacionada com a permeabilidade, que é um dos fatores que mais influenciam na secagem. Por outro lado, menor massa específica implica em maior quantidade de água no estado líquido, cuja movimentação depende principalmente do raio dos capilares, através dos quais verifica-se o escoamento do fluído, devido à estrutura da madeira, os capilares de menor raio serão as pontuações que interligam os lúmens dos diversos elementos anatômicos (ANDRADE, 2000). Assim, a permeabilidade é uma propriedade extremamente variável dentro de uma mesma peça de madeira não se conhecendo uma relação direta com a massa específica (JANKOWSKY, 1986; CAVALCANTE, 1991).

Além das características do material e das variáveis do processo, a preparação da carga para entrada na câmara de secagem também é outro aspecto de extrema importância no desempenho da secagem e na qualidade das peças ao final do processo (PONCE; WATAI, 1985). Hildebrand (1970), Galvão e Jankowsky (1985) afirmam que, para reduzir o período de secagem e minimizar os defeitos, a recomendação geral é secar uma espécie por vez e com peças, preferencialmente, de mesma espessura e qualidade. Além disso, a carga de madeira deve ter aproximadamente a mesma umidade no início da secagem.

Outro fator é o uso adequado dos tabiques ou sarrafos separadores que reduzem sensivelmente os empenamentos das tábuas, favorecendo que a secagem

transcorra de maneira mais rápida e uniforme. Os tabiques devem ser confeccionados de madeiras com alta resistência, sem defeitos. Suas dimensões devem ser de acordo com a largura da pilha, tipo e dimensões das tábuas a serem secas. O posicionamento, espaçamento e o alinhamento dos tabiques também são importantes durante o processo de secagem. Para redução dos empenamentos das tábuas durante a secagem, as fileiras de tabiques devem ser alinhadas verticalmente (PONCE; WATAI, 1985).

As principais restrições da secagem convencional são o alto investimento inicial e a necessidade de mão de obra especializada. Segundo a STCP (1990), os investimentos não se referem apenas aos custos diretamente relacionados à compra do secador, pois um setor de secagem convencional necessita ainda de caldeiras, instalações hidráulicas, elétricas, rede de vapor, barracões e outras obras que em seu conjunto geram custos elevados.

4.3 Secagem Combinada

A secagem combinada trata-se da união dos dois métodos, ar livre e convencional, ou seja, a madeira é exposta à secagem ao ar livre para secar até um teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, ou até um teor de umidade desejado. Após a madeira sair da secagem ao ar esta é submetida à secagem convencional em câmara de secagem para que atinja o teor de umidade final desejado. Pode-se ainda descrever a secagem combinada como um meio de facilitar a secagem da madeira até teores de umidade em torno de 25 a 30%, e logo após a saída da água livre, eliminar a água de impregnação de modo artificial (ROSSO, 2006).

Diversos autores Stohr (1977), Campbell e Hartley (1988), Nortway (1996) e Ciniglio (1998), têm sugerido como métodos aplicáveis à madeira de *Eucalyptus* uso da pré-secagem ou a combinação da secagem ao ar com posterior secagem convencional. Esta combinação proporciona redução de custos e otimização do processo, através da maior operacionalidade dos secadores.

É prática tradicional, em países como Austrália e África do Sul, a secagem ao ar livre da madeira de eucalipto da condição verde até o PSF, sendo posteriormente seca em câmara de secagem convencional até o teor de umidade final (VERMAS, 1995).

Ciniglio (1998), trabalhando com madeira serrada de *Eucalyptus grandise Eucalyptusurophylla*, e realizando isoladamente secagens ao ar e convencional, sugere a combinação de pré-secagem ao ar em local coberto, até o PSF, seguida de secagem convencional.

Estudos, conduzidos por Tomaselli (1992) e Melado (1993), mostram que a utilização de um sistema combinado de pré-secagem ao ar livre e secagem convencional, para madeira de eucalipto de 25 mm de espessura destinado, a caixotaria, leva cerca de dois meses para atingir o PSF e posteriormente, varia de cinco a dez dias em câmara de secagem para alcançar o teor de umidade final desejado.

Objetivando melhorar o processo de secagem da madeira, Jankowsky et al. (1998) realizaram experimentos com madeira recém cortada submetida diretamente à secagem convencional e envolvendo o uso da pré-secagem em lugares cobertos ou descobertos, com posterior secagem convencional, onde o estudo mostrou que a pré-secagem em ambiente coberto, mais secagem combinada proporcionou melhores resultados na qualidade da madeira.

Apesar da aceitação generalizada que a literatura registra sobre os efeitos positivos da pré-secagem na qualidade da madeira serrada, não há concordância entre os autores sobre o teor de umidade a partir do qual a madeira deveria ser submetida a secagem convencional. Stör (1977), considera que esse teor estaria entre 20% e 25% de umidade. Campbell e Hartley (1998), afirmam que a madeira deveria ser seca até atingir umidade em torno de 30%, enquanto que NORTHWAY, (1996), recomenda a secagem natural até umidade entre 40% e 50%.

4.4 Secagem por Microondas

Esta tecnologia é recente no Brasil, mas na Europa os primeiros relatórios acerca de sua utilização foram publicados entre 1950 e 1960 (Leiker et al., 2011). Porém, o seu uso para fins industriais, em processos de cozimento e secagem, começou a partir dos anos de 1940, empregando as frequências de 2450 e 915 MHz (Resch, 2006). De acordo com Lundgren (2005), o número de aplicações comerciais para a utilização de micro-ondas tem aumentado para uma variada gama de aplicações como aquecimento, comunicações, medições etc.

Uma característica da secagem por micro-ondas é o aquecimento de dentro para fora, gerando calor diretamente no centro da madeira. Por isso, o mecanismo da rotação dipolar é dominante para materiais com alta quantidade de água livre (McCloughlin et al., 2003), pois quando o material dielétrico é exposto a micro-ondas, os íons, átomos e moléculas são excitados e movem-se sob a influência do campo elétrico, produzindo calor que é transferido neste processo. Em um material com alta quantidade de água livre, muitas moléculas são normalmente orientadas aleatoriamente (Gao, 2010), porém o campo elétrico tende a alinhar com a rotação campo – dipolo. Com as flutuações do campo, estes processos de alinhamento e relaxamento ocorrem milhões de vezes por segundo, convertendo a energia elétrica em energia potencial e em seguida em calor.

O tratamento térmico utilizando micro-ondas é promissor, pois oferece oportunidade para o processamento de secagem da madeira em um curto espaço de tempo. Antti (1999) esclarece que a energia de micro-ondas pode ser utilizada com sucesso para o aquecimento rápido e secagem de madeira e de acordo com Torgovnikov&Vinden (2009), aumenta sua permeabilidade. Além disso, Seyfarth et al. (2003) mostram que a aplicação de micro-ondas reduz o tempo de secagem.

5 AUTOMAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO PARA O GERENCIAMENTO DE SECAGEM DE MADEIRAS

A instrumentação industrial é uma ciência que, de acordo com a organização norte-americana Instrument Society of America (ISA), estuda todo dispositivo usado para, direta ou indiretamente, medir e/ou controlar uma variável.

Conforme será visto posteriormente, os instrumentos podem estar interligados entre si para realizar uma determinada tarefa nos processos industriais. A associação desses instrumentos chama-se malha e em uma malha cada instrumento executa uma função.

Logo, a malha de controle pode ser representada conforme a Figura 1.

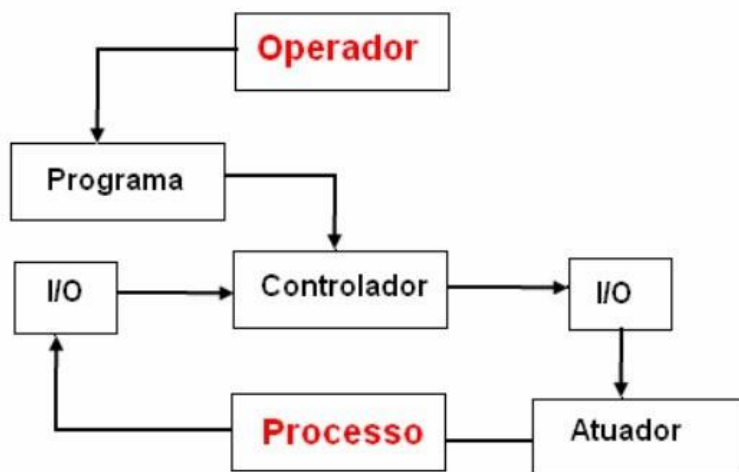


Figura 1 – Representação da malha de controle industrial.

Figure 1 – Representation of an industrial control mesh.

Fonte: o autor.

Considerando o processo de Secagem da Madeira, há ao menos três variáveis de controle fundamentais. São estas a temperatura, a umidade e o fluxo de ar entre a carga de madeira. Estas variáveis podem ser mensuradas e controladas por sistemas automáticos que, baseados em dados de controle, farão as escolhas de intervenção no sistema.

5.1 Os sensores do processo (inputs ou entradas)

Os sensores do processo são responsáveis pelo ingresso de informações no módulo de controle. Eles captam as variações no meio e informam ao controlador a realidade do momento, permitindo a interação com o meio a partir desta fonte de informações. Assim, como toda informação recebida, a confiabilidade é fundamental para a correta intervenção de controle.

Os sensores aplicados nos sistemas de automação de estufas de secagem são correlacionados às variáveis de controle fundamentais, ou seja, a temperatura, a umidade relativa do ar e a umidade da madeira. Basicamente pode ser afirmado que os sensores aplicados em geral em módulos de controle automáticos são fundamentados em conceitos elétricos. Logo, as variáveis mensuradas nestes casos, são a resistência elétrica ou a capacidade de condução de uma corrente elétrica.

5.2 Sensores de temperatura tipo bulbo de resistência

Um dos métodos elementares para medição de temperatura envolve mudança no valor da resistência elétrica de certos metais com a temperatura. São comumente chamados de bulbo de resistência e por suas condições de alta estabilidade e repetibilidade, baixa contaminação, menor influência de ruídos e altíssima precisão são amplamente utilizados em diferentes malhas de controle industrial. Essas características aliadas ao pequeno desvio em relação ao tempo o tornou um Padrão

Internacional (ITS-90) para a medição de temperatura na faixa de $-259,3467^{\circ}\text{C}$ a $961,78^{\circ}\text{C}$.

Alguns modelos aplicados na instrumentação são os termômetros a par termoeletrico e os termômetros à resistência elétrica (PT 100). Algumas comparações são expostas abaixo:

Vantagens da Pt-100 sobre os termopares:

- a) Possui maior precisão dentro da faixa de utilização do que outros tipos de sensores;
- b) Tem características de estabilidade e repetibilidade melhores do que os termopares;
- c) Com ligação adequada, não existe limitação para distância de operação;
- d) Dispensa o uso de fios e cabos de extensão e compensação para ligação, sendo necessário somente fios de cobre comuns, com malha de blindagem;
- e) Se adequadamente protegido (poços e tubos de proteção), permite a utilização em qualquer ambiente;
- f) Curva de Resistência x Temperatura mais linear;
- g) Menor influenciada por ruídos elétricos;

Desvantagens da Pt-100 sobre os termopares:

- a) São mais caros do que os sensores utilizados nesta mesma faixa;
- b) Range de temperatura menor do que os termopares;
- c) Deterioram-se com mais facilidade, caso haja se ultrapasse a temperatura máxima de utilização;
- d) É necessário que todo o corpo do bulbo esteja com a temperatura estabilizada para a correta indicação;
- e) Mais frágil mecanicamente;
- f) Para usar em aplicações aonde a temperatura de trabalho ultrapasse valores de 500°C , a prática não recomenda o seu uso, a não ser que seja incontornável esta situação;
- g) Sensores PT-100 quando utilizados acima de 300°C deve se tomar alguns cuidados para especificá-lo, de modo a melhorar a sua vida útil.

Uma informação de vasta utilidade quando há necessidade de inspecionar e verificar a funcionalidade de um sensor PT-100 é a correta leitura e interpretação da tabela de resistência ôhmica. Abaixo a Figura 2 descreve a relação entre temperatura e resistência ôhmica.

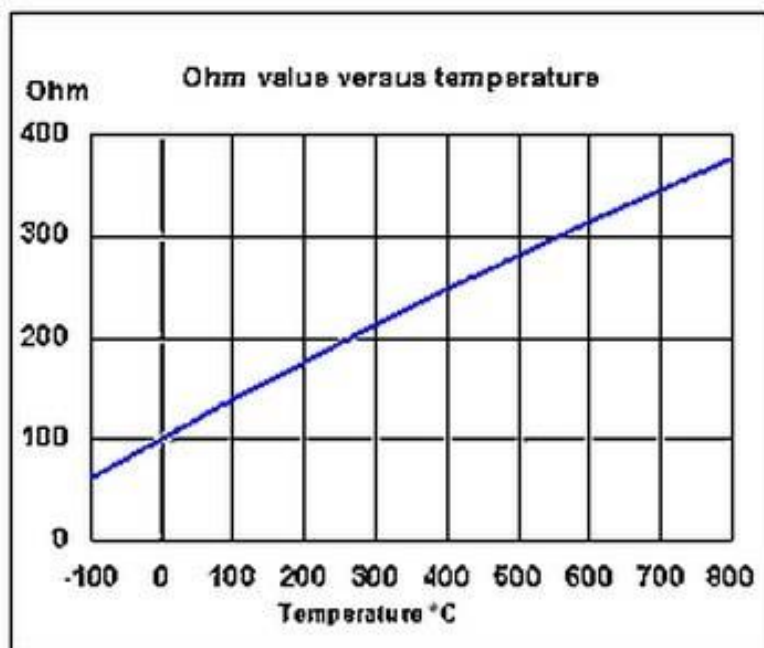


Figura 2 – Resistência Ôhmica do sensor tipo PT-100 em relação à temperatura na porta do bulbo.

Figure 2 – Ohmic resistance of the PT-100 sensor type in relation to the temperature at the bulb door.

Fonte: OJ Eletronics.

5.3 Sensores de umidade da madeira

Uma das variáveis de materiais higroscópicos que é comumente afetada pela umidade é a resistividade elétrica. Essa característica é aplicada para determinação da umidade da madeira. Com a variação interna da umidade da madeira, sua resistividade elétrica sofre alteração e, consequentemente, a leitura efetuada pelo sistema. A relação entre a umidade e a resistência elétrica é direta, porém não proporcional, dependendo de uma curva específica para espécies distintas. A lógica utilizada nesta medição é que, quanto menor a umidade da peça, maior a sua resistividade elétrica. Porém, outros fatores também influenciam esta medição, afetando a leitura de controle. Alguns exemplos são o aumento da distância entre os pinos, aumentando a matéria (massa) e assim a resistência elétrica, o crescimento irregular pontual da madeira (como um nó) que pode alterar a condutividade ou emendas mal feitas em cabos, as quais afetam o circuito elétrico e também distorcem a leitura do equipamento.

5.4 Transmissor de pressão

A medição da variável pressão pode ser realizada baseada em vários princípios, cuja escolha está sempre associada às condições da aplicação. Os transmissores eletrônicos analógicos possuem elementos de detecção e transferência que convertem o sinal de pressão detectado em sinal elétrico padronizado de 4 a 20 mA.

5.5 Medidores de vazão de vapor

Os medidores de vazão são elementos sensores amplamente utilizados na instrumentação industrial. Porém, não em secadores de madeira diretamente. Somente são aplicados em secadores de madeira a título de registro de consumo e, normalmente, visando a comparação em diferentes momentos de uma melhoria ou então para avaliar e comparar o consumo em diferentes secadores em uma mesma planta.

Os transmissores eletrônicos analógicos possuem elementos de detecção e transferência que convertem o sinal de vazão detectado em sinal elétrico padronizado de 4 a 20 mA. São muitos os princípios físicos relacionados com as medições de vazão que podem ser utilizados como elemento de controle. A especificação de cada modelo a utilizar depende do local de instalação entre outras características do processo.

5.6 Os atuadores do processo (outputs ou saídas)

Os atuadores do processo são os meios utilizados pelos sistemas de controle para intervir nas variáveis medidas. Sabendo que as variáveis de controle ainda são a temperatura, a umidade relativa do ar e a circulação de ar na superfície da madeira, os controles deverão atuar direta ou indiretamente nestas variáveis. Com base nos valores obtidos, o módulo central de processamento decide quais atitudes serão tomadas para intervir no ambiente

Os atuadores que serão detalhados a seguir são as válvulas de controle de fluxo, dumpers ou sistemas de renovação de ar, ventiladores e tipos de banho.

5.7 As formas de controle e sinais eletrônicos dos atuadores

Os sinais são divididos em duas formas de atuação. A atuação direta, também denominada como ON/OFF, é a forma mais simples de atuação em todo sistema de controle. Esta forma é exemplificada por válvulas de controle de fluxo que assumem duas posições. Ora o controle fecha a válvula impedindo o fluxo de vapor e, quando o sistema detecta a necessidade, a válvula é totalmente aberta para permitir o fluxo de calor. Assim também operam os pistões pneumáticos de simples e dupla-ação, ventiladores de partida direta, resistências elétricas entre outros atuadores.

Os sinais de controle aplicado são denominados analógicos ou proporcionais. Estes sistemas de controle possibilitam uma atuação mais refinada na variável de controle, atuando de forma variável de acordo com a demanda do processo. São exemplos de sistema proporcionais, utilizados em secadores de madeira, as válvulas motorizadas, válvulas eletro-pneumáticas, ventiladores modulados por inversores (variadores) de frequência e também os dumpers motorizados, com abertura orientado por um curso (fuso) mecânico conhecido. Estes elementos de controle proporcional dependem de um sinal de controle específico para sua atuação. Na automação industrial comumente são aplicados os sinais de 0 a 20 mA, 4 a 20 mA ou ainda 0 a 10 Volts. Dentre estas opções, o sinal 4 a 20 mA possui a vantagem de, ainda que o sinal enviado pelo sistema de controle seja totalmente fechado, a leitura do sinal estará ativa com 4 mA de leitura na rede, facilitando a constatação em caso de falha na condução de sinal.

A uma divisão entre os atuadores de acordo com o método, elemento de força, tipo de sinal de controle e acionamento que classificam os atuadores. Esta divisão é:

- Eletromecânicos: onde um elemento elétrico atua sobre uma peça mecânica e seu curso limitado para travas e finais de cursos definem seu range de atuação. É o caso de válvulas elétricas lineares com acionamento do posicionador em 220Vca e os dumpers de abertura proporcional.
- Eletroeletrônicos: estes atuadores recebem um sinal de controle que atua sobre o posicionador do elemento e define o tempo do acionamento para sua abertura ou fechamento. São os casos das válvulas com entrada de sinal 4 a 20 mA e acionamento do motor elétrico em 220Vca.
- Eletropneumáticos: Os posicionadores recebem um sinal de 4 a 20 mA e controlam a pressão do ar comprimido na câmara de posicionamento através da regulação do fluxo de ar. Esta forma de atuação é encontrado em válvulas de controle para vapor.

5.8 Válvulas de controle de vapor

Como exemplificado anteriormente, as válvulas de controle aplicadas nos secadores de madeira têm, geralmente, duas funções, o controle da temperatura ambiente e outra para o controle da elevação da umidade ambiente. No controle da temperatura uma segunda variável faz-se necessária, pois influenciará na velocidade de resposta e transferência de calor, que é a circulação de ar. O processo termodinâmico envolvido na troca de calor com o meio segue o seguinte fluxo: a válvula de controle libera a passagem de vapor aos trocadores de calor, os trocadores aquecidos cedem a energia ao ar que circula pelos radiadores e, após o aquecimento do ambiente, o próprio ar quente conduz calor para a peça de madeira. As válvulas de controle podem ser de atuação discreta ou proporcional.

As válvulas proporcionais são classificadas de acordo com o funcionamento do seu posicionador, forma de curso deste posicionador e tipo de abertura para passagem do fluido. Para cada tipo de processo ou fluido sempre há pelo menos um tipo de válvula que satisfaça os requisitos técnicos de processo, independente da consideração econômica. Cada um desses tipos de válvulas possuem as suas vantagens, desvantagens e limitações que dependem do tipo de processo.

As válvulas eletropneumáticas são projetadas para trabalhar com o posicionador que possibilita a variação proporcional da vazão através de um sinal de controle. Este posicionador fornece um sinal de feedback da válvula feito através de potenciômetro linear que informa ao sistema a real posição da válvula e define abertura da passagem. Já as válvulas dotadas de um atuador elétrico fazem a proporcionalidade baseadas no tempo de curso do elemento atuador. Assim, para o correto controle da abertura deste tipo de atuador é imprescindível a determinação exata do tempo de abertura de cada válvula, além da verificação periódica deste tempo de abertura. Define-se por válvula de deslocamento linear, a válvula na qual a peça móvel vedante descreve, um movimento retilíneo, acionada por uma haste deslizante. Enfim, as válvulas de movimento rotativo apresentam um elemento que se posiciona em relação a um eixo em seu centro.

5.9 Sistema de purga de condensado na rede de vapor

Os sistemas de purga ou remoção do condensado em linhas de vapor não são controlados pelos sistemas de automação em malhas de controle. Geralmente estes

elementos são instalados em distintos pontos da linha de vapor principal, mas é nas proximidades dos secadores que fica o foco de inspeção. Linhas de vapor inundadas tem baixa eficiência energética e apresentam desgastes prematuros em válvulas, tubulações, curvas, trocadores de calor e induzem o deslocamento turbulento do vapor, proporcionando outros fenômenos indesejados.

5.10 Inversores ou variadores de frequência

Um acionamento elétrico é um sistema capaz de converter energia elétrica em energia mecânica (movimento), mantendo sob controle tal processo de conversão. Estes são normalmente utilizados para acionar máquinas ou equipamentos que requerem algum tipo de movimento controlado, como por exemplo a velocidade de rotação de uma bomba. Os motores mais amplamente utilizados nos acionamentos elétricos são os motores de indução monofásicos e trifásicos. Estes motores, quando alimentados com tensão e frequência constantes, sempre que não estejam operando a plena carga (potência da carga igual à potência nominal do motor) desperdiçarão energia. Os dispositivos eletrônicos para variação de velocidade de motores de indução são conhecidos como Inversores de Frequência e proporcionam, entre outras, as seguintes vantagens:

- Economia de energia
- Melhora no desempenho de máquinas e equipamentos, devido a adaptação da velocidade aos requisitos do processo
- Elimina o pico de corrente na partida do motor
- Reduz a ocorrência de manutenções corretivas dos equipamentos

Muitos processos industriais requerem dispositivos de acionamento de cargas com velocidade variável. Exemplos:

- Bombas: variação de vazão de líquidos
- Ventiladores: variação de vazão de ar
- Sistemas de transporte: variação da velocidade de transporte
- Sistemas de dosagem: variação da velocidade de alimentação
- Tornos: variação da velocidade de corte

5.11 Dumpers ou sistemas de renovação de ar

Um dos controles fundamentais do sistema de secagem é a umidade relativa do ar, pois esta variável influencia diretamente na capacidade do ar em sequestrar maior quantidade de água. Por este motivo, os secadores possuem no mínimo dois métodos para intervir nesta umidade, sendo uma forma para reduzir e outra para elevar a umidade do ar.

Os dumpers, ou sistemas de renovação ambiente da estufa, são as janelas geralmente instaladas na parte superior dos secadores com objetivo de permitir a saída do ar úmido do interior do secador e receber ar seco do ambiente externo. Assim, é evidente que este elemento tem o objetivo de reduzir a umidade ambiente do interior do secador. Porém, as variáveis advindas do lado externo estão fora do controle do sistema. Bem como os demais elementos de controle dos secadores. Os dumpers podem trabalhar de duas formas: discreta ou proporcional. Os dumpers

podem receber o controle de diversas formas, porém os mais encontrados são de operação com cilindro pneumático, sendo esta uma forma discreta ou ON/OFF e os motorizados, cujo o curso de fuso com tempo de abertura determinado efetua o controle de abertura.

5.12 O controlador lógico programável (CLP)

Entre os principais inventos da humanidade, certamente os microprocessadores vislumbram uma posição de destaque. São estes elementos que permitem o homem “ensinar as máquinas” como devem trabalhar e quais ações devem tomar frente alguma situação conhecida. Essa capacidade de prever uma resposta perante um estímulo conhecido é parte da estrutura do software de um controlador lógico, que baseados em fatos ocorridos, propõe uma lógica de ação com base nestas informações coletadas. O controlador programável é um equipamento eletrônico baseado em microprocessadores. É projetado para funcionar em ambientes industriais, podendo controlar desde uma simples máquina até automatizar uma planta completa.

O controlador programável possui três blocos básicos: as Entradas, a unidade central de processamento (CPU) e as saídas. Através de dispositivos ligados ao modulo de entradas, o CLP monitora continuamente o estado da máquina (estufa, ou processo) sob seu controle. A CPU processa os dados externos através do programa do usuário (programa gravado previamente na memória do CLP). Simultaneamente, as saídas são acionadas conforme instrução contida no mesmo programa. Desta forma, um CLP sente, decide e age sobre a máquina (ou processo) conforme uma lógica pré-estabelecida. A interação entre os sinais de entrada do sistema, tais como os sensores, e as ações impostas ao sistema pelos atuadores, como as válvulas de controle, são determinados pelo controlador do sistema a partir da lógica programada que, na prática, é denominado de programação.

A linguagem utilizada para escrever este programa e o tempo de resposta de suas atuações são as principais diferenças entre os diversos controladores existentes no mercado. Porém, na maioria das vezes, essa diferença é pouco visível aos operadores do sistema. Quanto à estrutura física do controlador, é importante salientar que ele definirá a quantidade de entradas e saídas que o sistema está apto a receber bem como a quantidade de atuadores que poderá acionar. Além das quantidades, a composição física do controlador é fator determinante para saber se sua recepção de sinais ou saídas dos atuadores serão de forma discreta ou proporcional.

6 SUPRIMENTO DE ENERGIA E VAPOR: CALDEIRAS

Segundo a NR-13: “Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo”. De forma simples, uma Caldeira é uma espécie de geradores de vapor que se destina a gerar vapor através da troca térmica entre o material combustível e a água. Essa troca é feita por este equipamento construído com chapas e tubos cuja finalidade é fazer com que água se aqueça e passe do estado líquido para o gasoso (vaporização simples), aproveitando o calor liberado pelo combustível que faz com as partes metálicas da caldeira se aqueça, transferindo calor à água e produzindo o vapor.

As caldeiras são usadas na indústria madeireira tanto para a geração de vapor destinado à secagem quanto para a geração de energia a ser consumida por maquinário industrial.

6.1 Tipos de Caldeiras

Dependendo da utilidade, são exigidos tipos de caldeiras diferentes. É comum a classificação das caldeiras por finalidade:

- Caldeiras industriais: constituídas para suportar pressões e temperaturas elevadas;
- Caldeiras para usina de força termoeletrica: elaboradas para suportar altas pressões e temperaturas;
- Caldeiras combinadas: elaboradas para suportar a necessidade das indústrias e das termoeletricas.

A seguir são apresentados alguns tipos de caldeiras.

6.1.2 Caldeiras flamotubulares

A caldeira do tipo flamotubular pode gerar de 100 a 30 mil kg/h, com pressão de até 30 kgf/cm². Nesta caldeira, os gases quentes provenientes de queima de combustível passam através de tubos imersos em água. Estes tubos, por sua vez, aquecem a água, transformando-a em vapor. Esse tipo de caldeira apresenta construção mais simplificada em relação à distribuição de tubos, podendo classificá-los em verticais e horizontais.

6.1.3 Caldeiras Aquotubulares

A caldeira tipo aquotubular são aquelas onde a água que será vaporizada circula pelo interior dos tubos, enquanto os produtos do processo de combustão pelo exterior deles. Essas caldeiras são maiores que as flamotubulares apresentando construção mais complexa e por isso apresentam maior custo.

6.1.4 Caldeiras mistas

As caldeiras mistas, por sua vez, apresentam em sua estrutura partes referentes as caldeiras flamotubulares e outras com características aquotubulares. Quanto às formas de sustentação, as caldeiras mistas são suspensas e autossustentadas.

6.2 Alimentação de Caldeiras

Caldeiras podem ser alimentadas eletricamente ou com combustíveis. Combustíveis para a geração de vapor podem ser sólidos, como carvão; turfa; lenha; resíduos agrícolas como casca de arroz, casca de amendoim, etc; bagaço de cana e outros. Podem ser também líquidos, como óleo diesel e gasolina, por exemplo. E enfim podem ser gasosos, como é o caso do GLP.

Uma vez instalada em ambiente que usa um recurso renovável como a madeira, o combustível mais comum na indústria madeireira são os cavacos de madeira em forma de biomassa. A Biomassa, assim como petróleo, é um hidrocarboneto, mas, diferentemente dos combustíveis fósseis, possui átomos de oxigênio na sua composição química. A presença desse átomo de oxigênio faz com que a biomassa requeira menos oxigênio do ar e, conseqüentemente seja menos poluente, porém também reduz a quantidade de energia a ser liberada, reduzindo o seu poder calorífico.

O processo de combustão da biomassa sólida em caldeira consiste em quatro fases distintas, mas que podem acontecer simultaneamente em diferentes regiões da biomassa em reação:

- Aquecimento e Secagem: É o processo de retirada da umidade contida no combustível sólido pela adição de calor, que provoca a evaporação da água;
- Pirólise: Após a secagem do combustível sólido, se sua temperatura for elevada a níveis adequados, acontecerá a liberação dos gases inflamáveis contidos no sólido. Esta fase também é denominada de volatilização. Os gases liberados nesta fase, quando misturados com

o oxigênio do ar em proporções adequadas, tornam-se uma mistura inflamável;

- Combustão: Nesta fase, os gases formados no processo de pirólise reagem com o oxigênio numa reação exotérmica, tendo como produtos $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Calor}$ (produtos hipotéticos para uma reação ideal estequiométrica). O fogo normalmente é visível nesta fase;
- Pós-Combustão: Ao final da pirólise, a biomassa tornou-se uma massa sólida composta de carvão e cinza. As partículas de menores dimensões são arrastadas pelos gases e saem pela chaminé com a denominação de particulados. Uma fração do carbono e cinzas consegue gasificar e entra no escoamento na forma de CO , CH_4 e H_2 e outros gases. O restante do carvão e das cinzas é removido da câmara de combustão na forma de resíduos (ainda aproveitados em fábricas de cimento, por exemplo).

7 CONTROLE DE QUALIDADE DA BIOMASSA

Esta apostila aborda assuntos e conceitos referentes à biomassa – principalmente de vegetais lenhosos - destinada ao processo térmico de combustão.

A Figura 3 mostra os tipos de biomassa existentes e os processos pelos quais podem passar para a obtenção de energia.

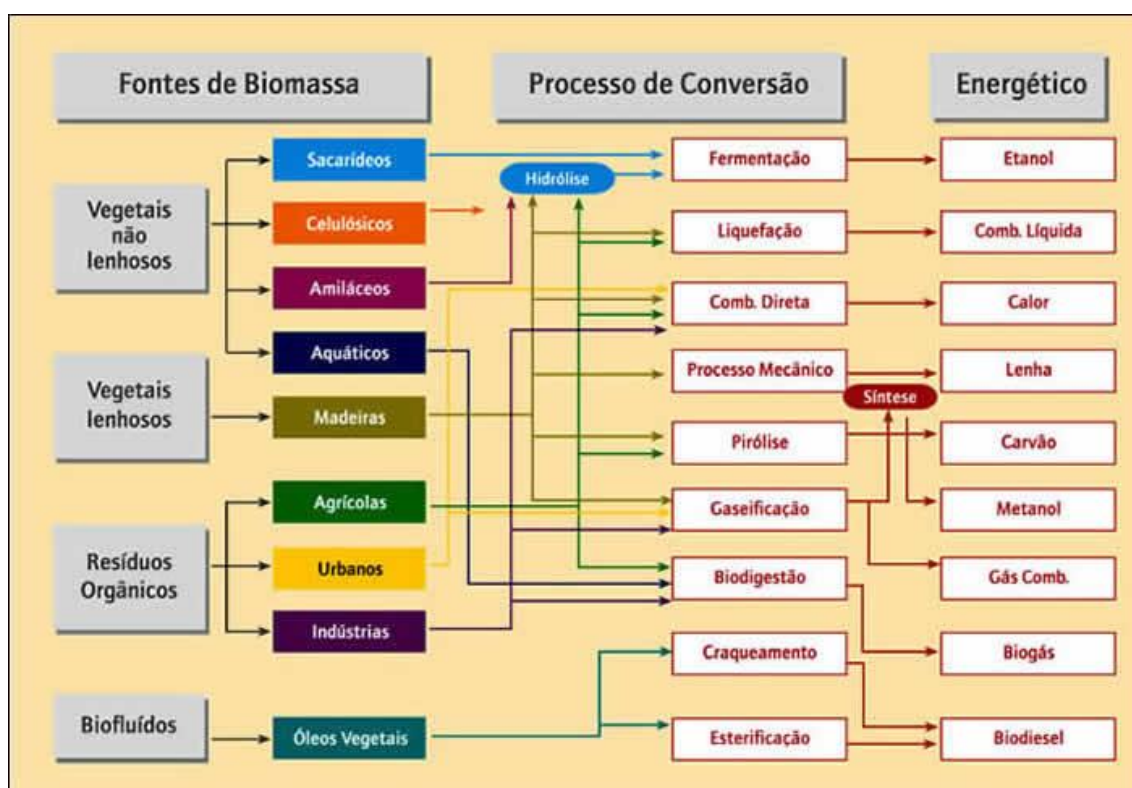


Figura 3 – Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.

Figure 3 - Schematic diagram of biomass energy conversion processes.

FONTE: Atlas de energia elétrica do Brasil.

De onde vem a biomassa no Brasil?

A biomassa no Brasil pode ser proveniente de resíduos de indústrias madeireiras (serrarias e indústrias de móveis), de resíduos florestais (raízes, galhos e folhas) ou de florestas energéticas.

A maioria das florestas energéticas plantadas no Brasil são de pinus e de eucalipto e está localizada no Estado de Minas Gerais. Os Estados seguintes, em quantidade de florestas plantadas, são São Paulo e Paraná (IBÁ, 2016).

Dentre as florestas plantadas brasileiras, a maioria atualmente é de posse de grandes grupos investidores e da indústria de celulose e papel (IBÁ, 2016). Estes grupos têm como objetivo, geralmente, crescimento rápido e alto incremento. Este fator implica em grande quantidade de madeira com menor densidade.

7.1 Propriedades energéticas da biomassa

7.1.2 Granulometria

A Figura 4 mostra um exemplo de classificação granulométrica de cavacos.

Especificação do tamanho e distribuição das partículas de cavaco de madeira			
Classe de tamanho	Fração Principal (>80% do peso)	Fração de finos (<5% do peso)	Fração grosseira Máximo tamanho de partículas
P16	3.15 mm < T < 16 mm	< 1 mm	Max. 1% > 45 mm, todos < 85 mm
P25	3.15 mm < T < 16 mm	< 1 mm	Max 1% > 45 mm
P45	3.15 mm < T < 45 mm	< 1 mm	Max 1% > 63 mm
P63	3.15 mm < T < 63 mm	< 1 mm	Max 1% > 100 mm
P100	3.15 mm < T < 100 mm	< 1 mm	Max 1% > 200 mm

Figura 4 – Classificação granulométrica de cavacos.

Figure 4 – Granulometric classification of woodchips.

FONTE: Lippel.

Na classe P16, por exemplo, em uma amostra de 10,0 kg de cavacos:

- 8,0 kg tem tamanho entre 3,15 mm e 16,00 mm
- no máximo 0,5 kg tem tamanho menor que 1,00 mm
- no máximo 0,10 kg tem tamanho maior que 45,00 mm e
- não há cavacos maiores que 85,00 mm.

Já na classe P100, em 10,0 kg de cavacos:

- 8,0 kg tem tamanho entre 3,15 mm e 100,00 mm
- no máximo 0,5 kg tem tamanho menor que 1,00 mm e
- no máximo 0,10 kg tem tamanho maior que 200,00 mm.

Ou seja: a classe P16 apresenta maior uniformidade – e consequente qualidade - nos cavacos que a classe P100. Entretanto, é o tipo de queimador utilizado que determina que tipo de granulometria deve ser exigida para os cavacos.

O controle da granulometria só pode ser feito através do controle dos seguintes parâmetros:

- Tipo do picador
- Velocidade de Avanço x Rotação
- Ângulo de corte das facas
- Espécie de árvores (Inteira com ou sem galhos)
- Presença de contaminantes
- Dureza da madeira (desgaste maior das facas)

7.2 Umidade

Segundo Klitzke (2002), existem dois tipos de água na madeira: água de capilaridade, também chamada de água livre e água de adesão ou higroscópica, também chamada de água presa. A água livre se encontra nos vasos, meatos, canais e lume das células. Ela é facilmente retirada da madeira e é esta que dá à madeira a característica de material higroscópico (que perde e ganha água com facilidade). Já a água presa está ligada às fibras da madeira. Sua retirada exige fornecimento de energia (geralmente térmica).

O ponto de transição entre a situação em que a madeira tem apenas água presa para a situação em que possui também água livre chama-se ponto de saturação das fibras (PSF). O PSF varia com diferentes espécies, entretanto, geralmente considera-se o PSF como aproximadamente 30% de umidade em base seca.

A unidade de umidade na madeira é a porcentagem e pode ser expressada em base úmida ou em base seca. A umidade em base úmida é o quociente entre a massa de água presente na peça e a soma entre a massa da peça seca e a massa de água. A umidade em base seca é o quociente entre a massa de água presente na peça e a massa da peça seca.

O motivo da sua utilização desta unidade é método normalizado para a determinação da umidade: o método gravimétrico, no qual determina-se a massa inicial da peça (ou da amostra de cavacos); seca-se totalmente a peça (ou amostra) e determina-se a massa da peça (ou amostra) ao final da secagem completa. A norma brasileira para a determinação da umidade em cavacos de madeira é a NBR 14929 (ABNT, 2017) e as equações (1), (2), (3) e (4) são formas de obtenção do resultado da umidade da biomassa e da conversão da umidade entre base úmida e base seca.

$$U_{bu} = \frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{úmida}} \quad (1)$$

$$U_{bu} = \left(\frac{U_{bs}}{100 + U_{bs}} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

$$U_{bs} = \frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{seca}} \quad (2)$$

$$U_{bu} = \left(\frac{U_{bu}}{100 - U_{bu}} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

onde:

U_{bu} é a umidade em % (base úmida);

$m_{úmida}$ é a massa inicial em g;

m_{seca} é a massa final;

U_{bs} é a umidade em % (base seca).

É comum usar a informação da umidade em base seca em indústrias madeireiras, já que ela expressa didaticamente a quantidade de água que se tem em mãos. Para uso da biomassa, entretanto, o interessante é saber qual é a quantidade de água

indesejável que se tem em mãos. É utilizado, portanto, no comércio de controle da qualidade da biomassa, a umidade em base úmida.

A Figura 1 exibe a relação entre informações de umidade em base seca e informações de umidade em base úmida. Percebe-se que quando o material está mais seco, a diferença não parece ser tão grande entre as informações nas duas bases. Entretanto, à medida que a umidade aumenta, esta diferença torna-se bastante significativa. 50 % de umidade em base úmida, por exemplo, é o mesmo que 100 % de umidade em base seca.

Figura 1 – Relação entre Umidade em Base Úmida e em Base Seca.

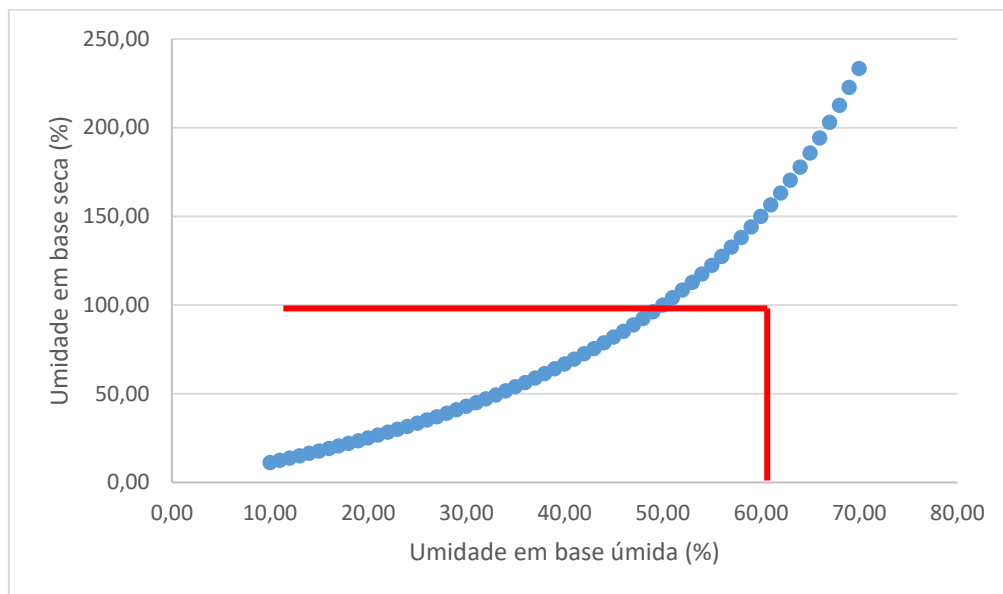


Figura 5 – Relação entre umidade em base seca e base úmida.

Figure 5 – Relationship between moisture in wet and dry basis.

FONTE: o autor.

7.3 Densidade

A densidade de um corpo define-se como o quociente entre a massa e o volume desse corpo. Entretanto, tanto a massa quanto o volume da madeira variam conforme a quantidade de água presente na peça – No caso do volume, a variação acontece com umidades menores que o PSF. Por este motivo é importante especificar qual era a umidade da peça no momento da análise da densidade. Neste contexto, existem dois tipos de densidade da madeira (e de cavacos):

- Densidade aparente, onde a medida de massa e a medida de volume são feitas na mesma umidade. É comum utilizar a informação da densidade aparente a 15% ou a 0% de umidade.
- Densidade básica, onde a medida de massa é feita a 0 % de umidade, ignorando-se os espaços vazios da madeira e a medida de volume é feita com a madeira (ou cavacos) saturada (os).

$$DA = \frac{m_u \%}{V_u \%} \quad (5)$$

$$DB = \frac{m_0 \%}{V_{\text{saturado}}} \quad (6)$$

onde:

DA é a densidade aparente em kg/m³;

DB é a densidade básica em kg/m³;

m é a massa em kg;

v é o volume e

u % é a umidade em base seca.

A norma para determinação da densidade aparente de cavacos de madeira no Brasil é a NBR 14984 (ABNT, 2003). Para a densidade aparente, é a NBR 11941 (ABNT, 2003).

Acima do PSF, conhecendo-se a umidade dos cavacos, é possível estimar o valor de densidade básica a partir do valor da densidade aparente, pois é possível estabelecer uma função de medição para cada espécie de madeira (dependendo de seu conteúdo e distribuição de espaços vazios) entre a densidade aparente em base seca e a densidade básica. Esta relação só é possível pela ausência de variação no volume de cavacos acima do PSF.

$$DA_{seca} = \frac{DA}{\left(\frac{u}{100} + 1\right)} \approx DB \quad (7)$$

onde

DA_{seca} é a “densidade aparente seca” em kg/m³;

DA é a densidade aparente em kg/m³;

U é a umidade em % (base úmida);

DB é a densidade aparente em kg/m³

m é a massa em kg;

v é o volume em m³.

7.4 Teor de Cinzas

O teor de cinzas determina a quantidade de material inorgânico presente na madeira; ou seja, a quantidade de material que não queima. Sua determinação é realizada através da incineração de uma amostra e, uma vez inexistente norma brasileira para a determinação de cinzas na madeira, pode ser utilizada a norma T 413 (Tappi, 2011).

7.5 Poder Calorífico

Poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de calor liberado pela queima (combustão) de 1 kg de combustível de modo que a água proveniente desta queima esteja em estado líquido. Ou seja, a queima acontece a volume constante, a água é condensada e o calor derivado da condensação da água é recuperado. (Lima, 2010).e Quirino et. al. (2005).

Poder calorífico superior (PCI) é a quantidade de calor liberado pela queima (combustão) de 1 kg de combustível de modo que a água proveniente desta queima esteja em estado gasoso. Neste caso, a combustão acontece a volume variável. O combustível entra em combustão com excesso de ar, os gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água e evitam assim que a água contida na combustão seja condensada (Lima, 2010).e Quirino et. al. (2005).

A diferença entre PCS e PCI é a entalpia de vaporização da água formada na reação de combustão. Como a temperatura dos gases de combustão é muito elevada nos motores endotérmicos, a água contida neles se encontra sempre no estado de vapor, portanto, o que deve ser considerado é o poder calorífico inferior e não o superior.

Poder calorífico líquido ou útil (PCU) é a quantidade de calor liberado pela queima, de modo que a água proveniente da queima esteja em estado gasoso (volume variável). No PCU é descontada a energia necessária para evaporar a água referente à umidade da madeira (Lima, 2010). O PCU também pode ser chamado de Poder Calorífico Líquido (PCL).

A análise do PCS é realizada em laboratórios através de um equipamento chamado calorímetro. A partir do valor do PCS, são calculados os valores de PCI e PCU.

$$PCI = PCS - \left(\frac{600 \cdot 9 \cdot H}{100}\right) \quad (8) \quad PCU = \left(PCI \cdot \left[\frac{100-U}{100}\right]\right) - (6 \cdot U) \quad (9)$$

onde

PCS é o poder calorífico superior em kcal/kg;

H é o teor de hidrogênio em %;

PCI é o poder calorífico inferior em kcal/kg;

PCU é o poder calorífico útil em kcal/kg e

U é a umidade em % (base úmida).

Por que determinar a umidade

Controlar a Umidade para Determinar Tempo de Estocagem

Pode-se observar que nos primeiros meses, durante a estocagem da biomassa, sua umidade diminui e seu poder calorífico aumenta, seguido por um período em que a umidade começa a diminuir e o poder calorífico, conseqüentemente, a aumentar. A Figura 6 mostra quatro lotes de biomassa estocados durante um estudo realizado na cidade de Lages - PR, que explicitam este fenômeno. Este estudo foi realizado com toras, entretanto, a mesma análise pode ser aplicada a cavacos de madeira.

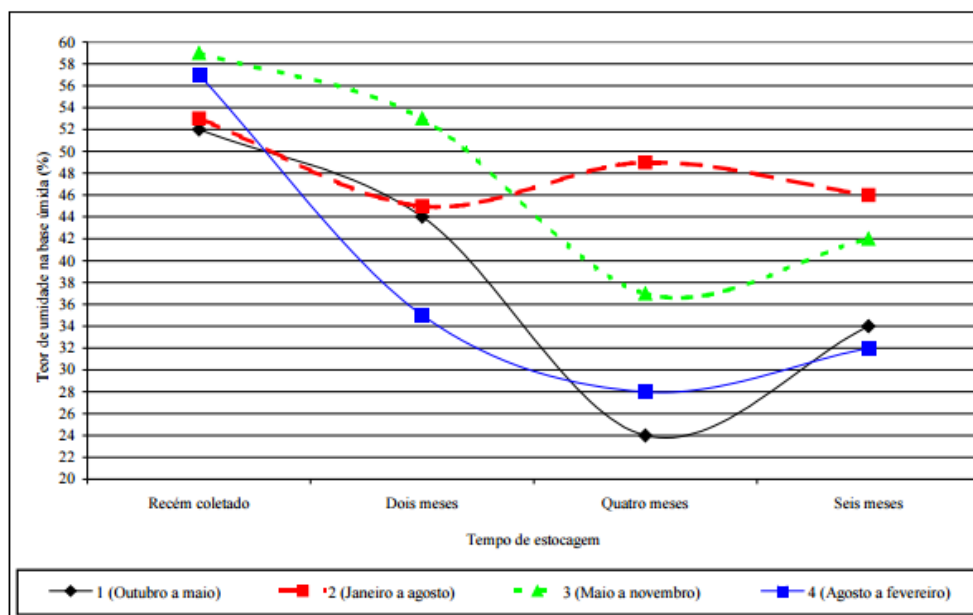


Figura 6 – Variação do teor de umidade na base úmida (%) da biomassa florestal (toras de Pinus e Eucalyptus e costaneiras de Pinus) durante o período de estocagem em quatro lotes.

Figure 6 – Moisture variation in wet basis (%) of forest biomass (Pinus and Eucalyptus lumber and Pinus coastal) during the stocking period in four lots.

FONTE: Brand, 2007.

Este fenômeno – a diminuição da umidade durante alguns meses e posterior aumento – pode ser explicado por dois fatores: a secagem do material durante os primeiros meses e posterior ataque de agentes biodegradadores. Durante os primeiros meses, o material estocado seca. Como não há fornecimento de energia, a umidade diminui até o PSF (aproximadamente 30% em base úmida). OPSF favorece o ataque de agentes biodegradadores da madeira. Este é o motivo do aumento da umidade a partir de determinado ponto. Os agentes biodegradadores podem ser insetos, bactérias e fungos, que atacam a madeira geralmente em conjunto. As bactérias consomem celulose, lignina, pectina e amido. Já os fungos (principalmente emboloradores e manchadores) consomem amido, celulose, hemicelulose e lignina. Alguns destes componentes são parte da estrutura da parede celular e seu consumo provoca o aumento da higroscopicidade da madeira, ou seja, o aumento da facilidade que a madeira apresenta para ganhar e para perder água. A madeira passa a ter PSF cada vez menor, passa a apresentar menores quantidades de água de ligação e mais facilidade para armazenar água livre. Sua composição muda. Além disso, fungos necessitam de oxigênio para reprodução. Portanto, o comum hábito de mexer pilhas de cavacos utilizando a pá carregadeira nos estoques de biomassa colabora para a proliferação de fungos.

7.6 Controlar a Umidade para o Transporte de Biomassa

Sabe-se que para madeira, o custo do produto final bruto destinado à logística, pode chegar a 30%. Esta informação varia conforme o local de produção e conforme o produto (cavacos, toras, etc...). Dentre as atividades de logística, aproximadamente 60% dos custos são destinados ao frete. Ou seja: neste contexto, 18% do custo do produto final bruto são destinados apenas ao frete da madeira.

No Brasil, os fretes são remunerados por metro cúbico transportado por quilômetro. Neste contexto, quanto mais água presente na carga transportada, mais pesada a carga e consequentemente, mais cara.

7.7 Controlar a Umidade para o Rendimento Energético

A Figura 5 exibe a seguinte simulação do impacto energético na seguinte situação: foi contratada uma carga com 40 toneladas de cavacos de eucalipto a 40% de umidade (umidade padrão) e foram entregues 40 toneladas de cavacos a 50% de umidade em base úmida (umidade real).

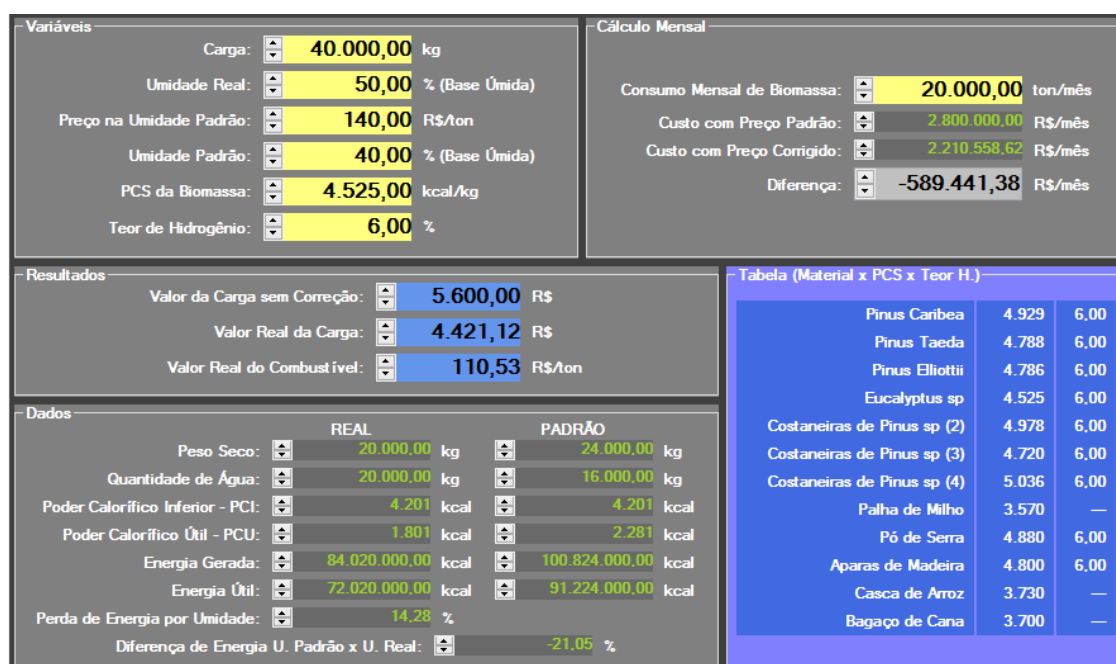


Figura 7 - Impacto energético causado pela diferença de umidade de 40% para 50% de umidade em base úmida em cavacos de eucalipto.

Figure 7 – Energetic impact promoted by moisture differences from moisture of 40% to 50% in wet bases in eucalyptus woodchips.

FONTE: MARRARI, 2016.

Considerando o poder calorífico superior e o teor de hidrogênio, é possível determinar o poder calorífico útil tanto para a carga contratada com umidade padrão, igual a 2281 kcal/m³, quanto para a carga entregue com umidade real, igual a 1801 kcal/m³. A diferença entre estes dois valores é igual a 21,08%.

Na simulação da Figura 5, para um material cujo preço a 40 % de umidade é igual a R\$140,00, 40 toneladas de eucalipto a 40% de umidade gerariam aproximadamente 91 megacalorias aproveitáveis. 40 toneladas a 50% gerariam apenas 72 megacalorias. Esta diferença de aproximadamente 20% determina o desconto que deve ser aplicado para a

correção de valor na comercialização da biomassa. Fazendo os cálculos para esta situação repetindo-se diariamente durante um mês, um consumidor de biomassa que recebe 20.000 toneladas por mês faria uma correção de quase meio milhão de reais.

O mesmo vale para casos contrários: quando a biomassa é entregue mais seca do que a biomassa contratada, deve-se também calcular a bonificação referente a quantidade de energia extra entregue ao consumidor.

8 MÉTODOS PARA A MEDIÇÃO DE UMIDADE

Este capítulo traz um breve resumo do funcionamento dos métodos existentes para a medição de umidade de biomassa, já abordado por Nyströmet. *al.* (2004). As Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5 relatam vantagens e desvantagens de cada método.

8.1 Métodos Primários

Os métodos primários para a análise da umidade da biomassa não têm como objetivo rápidos resultados para definir descontos ou bonificações por umidade no comércio de biomassa, pois exigem mais tempo e pessoal qualificado, são aplicáveis a pequenas amostras e são destrutivos. Entretanto, são os métodos com maior precisão e exatidão e devem ser utilizados como referência da calibração dos métodos secundários (Capítulo 3.4.2).

8.2 Método Gravimétrico

Esta metodologia é descrita pela NBR 14929 (ABNT, 2003) e é o único método normalizado aplicável para biomassa. Consiste na determinação da massa da amostra a ser analisada no estado de umidade a ser determinada, na sua secagem completa e na determinação da sua massa seca. O resultado pode ser expresso em base úmida ou em base seca (Capítulo 2.2).

8.3 Método Karl Fischer

Este método envolve a diluição da amostra a ser analisada em metanol e seguinte adição dos reagentes Karl Fischer (KF) na solução. Os reagentes KF reagem com a água presente no material (dentre eles, iodo e dióxido de enxofre) e através do consumo dos reagentes KF a determinação da quantidade de água na solução pode ser determinada.

8.4 Método Indireto

O principal objetivo do Método Indireto é analisar um período de combustão que já aconteceu. A umidade é determinada a partir dos gases do queimador. Ou seja, o cálculo da umidade faz parte dos cálculos de eficiência e exige fontes de informação como a fração de combustível não queimada (CO restante) e a quantidade de cinzas em suspensão.

8.5 Métodos Secundários

O objetivo dos métodos secundários é a análise rápida de grandes amostras capaz de fornecer resultados em tempo hábil para aprovação e recusa de cargas e para a determinação da qualidade afim de decisão de preços da biomassa.

8.5.1 Espectroscopia de Infravermelho Próximo (NIR)

Este método é aplicável a diversos fins (também densidade, composição, etc...) e se baseia nas partes refletidas e refratadas de um espectro de luz na faixa do infravermelho que depende de: composição química da amostra; densidade da amostra e distância da fonte de luz até a amostra. A fração interpretada graficamente através de um espectro que é comparado ao espectro já obtido de um padrão – neste caso, um dos espectros dos componentes da água: o hidrogênio.

Tabela 8 – Vantagens e Desvantagens do Método NIR.

Vantagens	Desvantagens
Instantâneo	
Pode ser aplicado online	
Não destrutivo	
Não exige mão-de-obra especializada.	
	Alto custo
	Não é normalizado.
	Exige calibração.
	É superficial.

FONTE: Os autores.

8.5.2 Dielétrico – Princípio de Microondas

O Método dielétrico com princípio de micro-ondas se baseia na emissão de um campo elétrico com frequência na faixa micro, cuja energia atravessar o material e ser captada em um receptor ou pode ser absorvida pela amostra analisada.

Tabela 9 – Vantagens e Desvantagens do Método Dielétrico Princípio de Microondas.

Vantagens	Desvantagens
Instantâneo	
Pode ser aplicado online	
Não destrutivo	
Não exige mão-de-obra especializada.	
	Alto custo.
	Não é normalizado.
	Exige calibração.
	Exige proteção (segurança).

FONTE: Os autores.

8.5.6 Dielétrico – Princípio Capacitivo

O Método Dielétrico aplicado através do princípio capacitivo é semelhante ao método de micro-ondas, mas ao invés de sinais de emissão e recepção, o método dielétrico conta com um sensor emissor que capta a perturbação causada em um campo elétrico emitido na frequência na faixa de rádio.

Tabela 10 – Vantagens e Desvantagens do Método Dielétrico Princípio Capacitivo.

Vantagens	Desvantagens
Instantâneo	
Pode ser aplicado online	
Não destrutivo	
Não exige mão-de-obra especializada.	
Custo “médio” - os maiores custos são decorrentes de instalações e análises para	
	Não é normalizado.
	Exige calibração.

FONTE: Os autores.

8.5.7 Raios X

Neste método, a radiação X absorvida pela amostra é comparada com a radiação total emitida. Como este método é relativo, ele precisa de calibração.

Tabela 11 – Vantagens e Desvantagens do Método de Raios X.

Vantagens	Desvantagens
Instantâneo	
Pode ser aplicado online	
Não destrutivo	
Não exige mão-de-obra especializada.	
	Alto custo
	Não é normalizado.
	Exige calibração.
	Exige proteção (segurança).

FONTE: Os autores.

8.5.8 Ressonância Magnética

O método de ressonância magnética está relacionado à quantidade de energia para movimentar átomos de hidrogênio que estão alinhados em um campo magnético. Esta quantidade de energia depende da força do campo. Assim, os movimentos podem ser registrados com espectroscopia de ressonância nuclear magnética.

Tabela 12 – Vantagens e Desvantagens do Método Ressonância Magnética.

Vantagens	Desvantagens
Instantâneo	
Pode ser aplicado online	
Não destrutivo	
Não exige mão-de-obra especializada.	
	Altíssimo custo
	Não é normalizado.
	Exige calibração.
	Exige proteção (segurança).

FONTE: Os autores.

Representatividade – Que quantidade de cavacos analisar para saber qual é a característica média da carga?

Faz-se necessária a apresentação de alguns conceitos estatísticos aplicados à análise da umidade de cavacos de madeira, esclarecidos por Witteet. *al.* (2005).

- População é o total de material que se quer analisar;
- Amostra é um subconjunto da população que deve ser analisado para inferir a média de umidade da população;
- Nível de confiança (IC) é o percentual de certeza que se quer ter sobre o resultado obtido;
- Desvio padrão (σ) significa que aproximadamente 68% das amostras contidas na população está distante em mais ou menos σ da média, que aproximadamente 95% está distante em mais ou menos 2σ da média e que quase 100% está distante entre mais ou menos 3σ da média
- Erro Máximo (e) é a diferença tolerada entre o resultado obtido e a média.

A definição do tamanho amostral para análise de umidade em cargas de biomassa é bastante desafiadora, já que as cargas de biomassa têm grandes quantidades e que a determinação da umidade da carga pode provocar desconto ou bonificação em alto valor financeiro.

É comum a assinatura de contratos entre fornecedores e consumidores de biomassa definindo um erro máximo de medição de umidade em duas unidades percentuais. Para expor o desafio de amostragem em uma carga de 35 toneladas, por exemplo, para obter um resultado com 99% de certeza, com erro máximo desejado igual a duas unidades e desvio padrão igual a 5 unidades seriam necessárias 275 amostras de 200 gramas (quantidade recomendada pela NBR 14929 (ABNT, 2003). Esta coleta torna-se inviável e reforça a necessidade de métodos secundários e mais abrangentes para a análise instantânea da umidade.

Metrologia – Como certificar meus equipamentos?

É comum que exista a confusão entre certificação de produto e certificação de calibração. Ambas existem e podem ser aplicadas a medidores de umidade. Entretanto, a certificação de calibração é a certificação de interesse para a aplicação destes equipamentos. Ambas são realizadas junto ao INMETRO.

A certificação de um produto pode ser compulsória ou voluntária. Ela é voluntária quando a empresa decide que deve ou não certificar seu produto, de acordo com os benefícios que acredita obter com a certificação. Ela é compulsória quando um regulamento determina que a empresa só pode produzir/comercializar um produto depois de certificado. A certificação de um produto é definida por uma portaria do INMETRO. Por exemplo, existe uma portaria para refrigeradores, outra portaria para carros, etc... Para medidores de umidade não existe ainda nenhuma portaria no INMETRO.

Baseado no Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM, 2012), a certificação de calibração é a garantia de que um instrumento faz uma medida semelhante à uma medida padrão. No caso dos medidores de umidade, a medida padrão é a medida de umidade obtida através do método gravimétrico pela NBR 14929 (ABNT, 2017). O certificado de calibração pode ser emitido por laboratórios acreditados pelo INMETRO ou por laboratórios que cumpram as exigências da NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2005), capazes de obter resultados rastreáveis.

É importante salientar que para medidores de umidade de cavacos de madeira, nenhum dos certificados é obrigatório. O interesse no certificado de calibração de um equipamento é definido pelo usuário do equipamento, bem como a periodicidade com a qual o usuário fará a calibração. O trecho abaixo é encontrado na NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2005).

9 TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO

O presente trabalho considera as determinações expedidas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) e as normativas expedidas e orientadas pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO).

De acordo com orientação da FAO, tratamento fito sanitário de madeira, regimentado pelo acordo internacional NIMF 15, são medidas que reduzem o risco de introdução e disseminação de pragas quarentenárias associadas com o movimento no comércio internacional de material de embalagem de madeira bruta. Sendo incluso dentre os materiais as escoras de madeira para transporte, suporte de paletes ou a estrutura das embalagens. Ainda, de acordo com a norma da FAO, madeiras processadas, tais como chapas de madeira reconstituídas, dispensam tal certificação.

Caso não existisse a disponibilidade de tratamento térmico para embalagens, a norma NIMF 15 orientava a utilização de brometo de metila como tratamento químico alternativo. Porém, em muitos países cujo o trânsito de embalagens é significativo, em especial para o mercado brasileiro, já não são aceitos tais tratamentos e recusam embalagens que sofreram exposição a químicos contaminantes.

As exigências nacionais, via de regra, atendem as especificações determinadas pela organização mundial. Porém, dadas necessidades específicas de cada nação, alguns parâmetros podem ser acrescidos ou ampliados, mas não podem minimizar a abrangência dos acordos internacionais. Um exemplo desta mudança é a norma portuguesa, que exige 5 sensores de temperatura, sendo 4 cravados na madeira e apenas 1 registrando o ambiente. Já a norma HOSETRAM, na Argentina, inclui os sensores de bulbo úmido no controle do tratamento. As normas emitidas pelo órgão brasileiro são denominadas Instruções Normativas e devem ser periodicamente consultadas no site do próprio ministério. Essa

consulta deve ser sistêmica pois as instruções podem ser alteradas pelo órgão regulador sem a necessidade de comunicado prévio. As instruções que deverão ser consultadas para exportação de madeira e embalagem deste material são citadas na Figura 24.

Decreto nº 24.114, de 12/04/1934
Lei nº 7.802, de 11/07/1989
Decreto nº 4.074, de 04/01/2002
Instrução Normativa Conjunta nº 01, de 10/09/2002
Instrução Normativa Conjunta SDA/MAA 1/2003
Instrução Normativa nº 04, de 06/01/2004
Instrução Normativa SDA/MAPA 19/2005
Instrução Normativa SDA/MAPA 66/2006
Decreto nº 5.741 e 5.759, de 2006
Instrução Normativa nº 66, de 27/11/2006
Decreto 6.759, de 2009
Lei nº 12.715, de 2012
Instrução Normativa SDA/MAPA 32/2015

Figura 8 – Instruções para exportação de madeira e embalagem.

Figure 8 – Instruction for wood and packinf export.

Fonte: Instruções MAPA para exportação e IN 32_SDA/MAPA, adaptado pelo autor (2016).

A documentação básica para cadastro e credenciamento no MAPA seguirá o exposto na tabela a seguir, na Figura 25.

Requerimento de cadastro no MAPA
Comprovante de regularidade fiscal
Registro da empresa no CREA
Registro dos RT's no CREA e emissão da respectiva ART
Registro da empresa nos órgãos estaduais de agricultura e de saúde
Licença ambiental no órgão estadual do meio ambiente
Certificado de treinamento dos operadores do sistema
Certificado de calibração dos sensores e controlador
Demais exigências da legislação vigente

Figura 9 – Documentos necessários para cadastro no MAPA.

Figure 9 – Required documentation for application in Mapa..

Fonte: Instruções MAPA para exportação e IN 32_SDA/MAPA, adaptado pelo autor (2016).

Caberá ao exportador providenciar toda a documentação referida e manter atualizada conforme orientação constante nos procedimentos técnicos operacionais informados pelo MAPA.

A certificação do sistema, exigida pela instrução normativa nº32 de 2015, consiste na emissão dos certificados de aferição dos sensores e controladores que façam parte do sistema de tratamento. Esta certificação deverá seguir os padrões determinados pela RBC/INMETRO, sendo esta uma maneira reconhecida para validar as leituras efetuadas pelo sistema. Os procedimentos utilizados para esta certificação seguem os padrões da ABNT e serão assinados por profissional habilitado.

Os procedimentos operacionais e manuseio do sistema de automação, poderão sofrer alterações de acordo com o fornecedor ou a versão do sistema do cliente. Porém, alguns procedimentos serão comuns a todos sistemas e estes serão citados a seguir. Já as especificidades de cada sistema serão identificados no manual de cada produto.

Dentre as operações comuns a todos equipamentos citamos:

- o comunicado de tratamento ao MAPA;
- a identificação do produto a ser tratado;
- quantificação do produto;
- tomada de 2 pontos de temperatura ambiente
- tomada de 2 pontos de temperatura com sensores cravados na madeira;
- a identificação dos sensores de temperatura ambiente na estufa de secagem;
- garantia de circulação de ar por toda a estufa de maneira mais uniforme possível;
- cadastro do ciclo de tratamento;
- emissão do relatório de tratamento;
- arquivo de todos tratamentos concluídos;

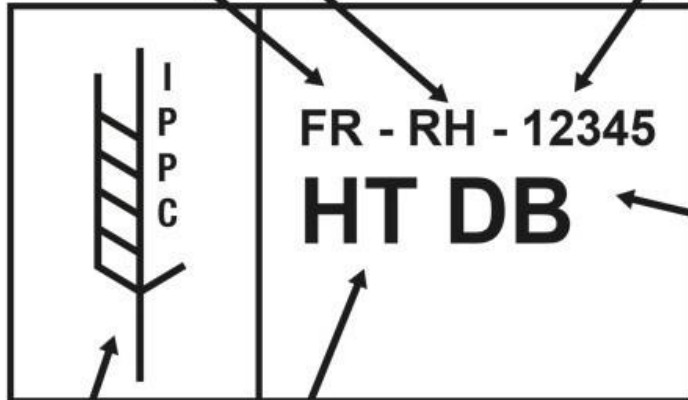
O cadastro do ciclo deverá ocorrer na partida da secagem ou tratamento. Os sistemas deverão registrar as temperaturas antes, durante e posterior ao tratamento térmico. O cadastro de um novo ciclo só poderá ocorrer na partida de cada tratamento/secagem. O controle do sistema deverá ser observado pelo operador do início ao final do ciclo, sendo validado após a conferência e assinatura reconhecida do responsável técnico.

Após a realização do tratamento, a madeira deverá ser identificada com selo de tratamento, conforme a orientação descrita na IN 32/2015 do MAPA. Além desta identificação, caso o exportador não realize o tratamento de toda madeira beneficiada em seu processo, deverá ser segregada a madeira com tratamento da que não estiver. A Figura 26 é o exemplo de um selo de certificação.

Pays où le fournisseur (fabricant ou réparateur) est enregistré (FR = France)

Région (dans cet exemple,
RH = Rhône Alpes).

Numéro d'enregistrement de l'entreprise
attribué par le SRPV de sa région.
Chaque entreprise possède un numéro
différent.



Les lettres DB
signifient que le bois
a été écorcé
(debarked en anglais).

Type de traitement effectué, dans cet exemple :
HT = traitement thermique, 56° à coeur pendant 30 minutes.

Logo de marquage réservé aux emballages
traités conformément à la NIMP 15 / ISPM 15

C'est une marque déposée, protégée légalement, ce qui permet à l'Etat
d'exercer des poursuites judiciaires à l'encontre de personnes physiques
ou morales utilisant ce marquage sans y être autorisé.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, A. **Indicação de programas de secagem convencional de madeiras**. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2000.
- Antti L. *Heating and drying wood using microwave power* [tese]. Skelleftea: Luleå University of Technology; 1999.
- BATISTA, D. C. **Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de nove clones do gênero *Eucalyptus***. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.
- BONDUELLE, G. M. **Avaliação e análise dos custos da má qualidade na indústria de painéis de fibras**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1997. 288p. Tese Doutorado. <<http://www.eps.ufsc.br/teses97/bonduelle/index.html>>. 05 Abr. 2012
- CAVALCANTE, A. de A. **Ocorrência do colapso na secagem da madeira de *Eucalyptus***. 1991.
- CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandise* e *E. urophylla***. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.
- COMOSTOCK, G. L. **Directional permeability of softwoods**. Wood and fiber, 1 (4): 283-289, 1970.
- FRICKE, K.W. The relation of humidity and air circulation to the drying of timber. Melbourne, Forest Laboratory Research Paper, 1995.
- GALVÃO A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.
- Gao F. *Comparison of microwave drying and conventional drying of coal* [dissertação]. Ontario: Queen's University Kingston; 2010.
- HERZBERG, B. L.; TAYLOR, F. W.; ROSEN, H. N. Factors that affect the time required to high-temperature dry pine dimension lumber. **Forest Products Journal**, v. 35, n. 7/8, p. 34-36, 1985.
- HILDEBRAND, R. El secado de maderas serradas. Madrid, Comercial Sagra S.A., 1964.
- HILDEBRAND, R. Kiln Drying of Sawn Timber. Germany: R.H. Maaschinebau GMBH, 1970.
- HIRSCHFELD H. **Engenharia Econômica e Análise de Custo; Aplicações Práticas para Economistas, Engenheiros, Analistas de Investimentos e Administradores**. 6° E. Editora Atlas SP, 407p., 1998.
- JANKOWSKY, I. P. **Potencialidade do creosoto de *Eucalyptus* spp como preservativo para madeiras**. 159p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1986.
- KLITZKE, R. J. **Manual de secagem de madeira**. Apostila técnica. 119 p. 2007.
- KLITZKE, R. J. **Uso do inversor de frequência na secagem de madeiras**. 2002. 239f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- KOCK, P. **Process for straightening and drying Southern pine 2 by 4s in 24 hours**. For. Prod. J. 21 (5):17-24, 1971.
- KOLLMANN, F.F.P.; SHENEIDER, A. Der einfluss der Stromungsgeschwindigkeit auf die Heißdampftrocknung von Schnittholz. Holz als Roh- und Werkstoff, 19, 461-478. 1961.

KOLLMANN; F. F. P; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood Science and technology**. Berlin, Springer Verlag, 1968, 592p.

Leiker M, Aurich K, Adamska MA. *Accelerated drying of single hardwood boards by combined vacuum-microwave application*. Nanjing: IUFRO; 2011. [citado 2011 jan 20]. Available from: http://tudresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/akultaet_maschinenwesen/ifvu/tvu/dteien/pdfs/Accelerated_Drying.pdf.

LEONE, G. S. G.: **Custos: Planejamento, implantação e controle**. Atlas, 2º Edição. São Paulo, 1989.

LOPES F. S & WIPIESKI C. **Termelétricas: uma nova oportunidade de negócios na indústria madeireira**. Informativo STCP, n.5 p.16-18, 2001.

Lundgren N. *Modelling microwave measurements in wood* [tese]. Skellefteå: Luleå University of Technology; 2005.

McLoughlin CM, McMinn WAM, Magee TRA. Microwave drying of multi-component powder systems. *Drying Technology* 2003; 21(2): 293-309. <http://dx.doi.org/10.1081/DRT-120017750>.

MELO, J. R. **Secagem de madeiras**: teoria e prática de secagem artificial de madeiras. Lisboa: Estação Florestal Nacional, 1999.

MENDES, A. S.; MARTINS, V. A.; MARQUES, M. H. B. **Programas de secagem para madeiras brasileiras**. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1998. 114p.

PONCE, R. H.; WATAI, L.T. **Manual de secagem de madeira**. Brasília MIC ;STI; IPT, 1985. 70p.

PRATT, G.H. **Timber drying manual**. London: Department of the Environment/Building Research Establishment, 1974. 152p.

RODRIGUEZ, K.F. & ROZENFELD, H. **Análise da Viabilidade Econômica**. Disponível em: http://www.portaldeconhecimentos.org.br/index.php/por/Conteudo/Analise-de-Viabilidade-Economica#eztoc114674_. Acesso em agosto, 2015.

ROSSO, S. **Qualidade da madeira de três espécies de eucalipto resultantes da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional**. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

Salamon, M. Comparison of Kiln schedules for drying spruce. *Forest Products Journal*, v.23n.3, 1973.

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

SANTINI, E. J. Métodos de secagem de madeira. In: I Seminário sobre secagem de madeira, 1, 1992, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, p. 47-59. 1992.

SEVERO, E.T.D. **Estudo sobre o efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem da madeira de *Eucalyptusdunnii* Maid.** 200 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

SIEMENS, SimovertMasterdrives –**Enginnering Manual for drive converts**, 1999.

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

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1991. 274p.

STANGERLIN, D. M.; SANTINI, E. J.; SUSIN, F.; MELO, R. R.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v.19, n.4, p.461-472, 2009.

TOMASELLI, I. **Secagem de madeira**. Curitiba: FUPEF, 1981. 29p.

Torgovnikov G, Vinden P. High-intensity microwave wood modification for increasing permeability. *Forest Products Journal* 2009; 59(4): 84-92.

VRANIZAN, J; WOHLGEMUTH, C. W. **Conserving electricity in lumber dry kilns**. For. Ind., San Francisco, v. 115, n.7, p. T28-T30, July 1998.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Biomassa. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/biomassa/5_3.htm>. Acesso em: 03. jul. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929: Madeira - determinação do teor de umidade de cavacos – Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14984: Madeira – determinação da densidade aparente de cavacos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941: Madeira – determinação da densidade básica de cavacos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO/IEC 17025:Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005.

BRANDT, M., A. Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem. Curitiba, UFPR, 2007.

BRASIL. Instrução Normativa nº 32, de 23 de setembro de 2015. Estabelece os procedimentos de fiscalização e certificação fitossanitária de embalagens, suportes ou peças de madeira, em bruto, que serão utilizadas como material para confecção de embalagens e suportes, destinados ao acondicionamento de mercadorias importadas ou exportadas pelo Brasil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, vinte e três de setembro de dois mil e quinze. Disponível em: <<https://idg.receita.fazenda.gov.br/orientacao/aduaneira/manuais/despacho-de-importacao/legislacao/outras-normas/instrucao-normativa-mapa-no-32-2015>>. Acesso em 03. jul. 2017.

BRASIL. Portaria GM nº 3.214, de 08 de junho de 1978. Aprova as Normas Regulamentadoras - NR - do Capítulo V, Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativas a Segurança e Medicina do Trabalho. Diário Oficial da União, Brasília, DF, oito de julho de 1978. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/sileg/integras/839945.pdf>>. Acesso em: 03. jul. 2017.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório IBA 2015. São Paulo. 2015.

INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA (ISA). What is automation?.Disponível em : <https://www.isa.org/about-isa/what-is-automation/>. Acesso em: 03 jul. 2017.

IPPC Symbols. Selo de certificação fitossanitária. Disponível em: <http://weknownyourdreamz.com/symbols/ippc-symbol.html>. Acesso em: 03. jul. 2017.

KLITZKE, R., J. Uso do Inversor de Frequência na Secagem de Madeira. Curitiba, UFPR, 2002.

LIPPEL. Qualidade dos Cavacos. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/dados/download/05-05-2014-10-36qualidade-dos-cavacos-para-combustao.pdf>. Acesso em: 03. jul. 2017.

MARRARI AUTOMAÇÃO. Controle da Qualidade de Biomassa. Disponível em: <<https://prezi.com/5nhb7jjuw-1/curso-basico/>>. Acessoem: 03. jul. 2017.

NYSTRÖM, J.; DAHLQUIST, E. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants—a review. Fuel, v. 83, 2004.

OJ ELETRONICS. PT Sensor Type: PT-100. Disponível em: <<http://www.ojelectronics.com/Business-Areas/PT-100-Sensors-PROD90.aspx>>. Acessoem: 03. jul. 2017.

THOMAS, H. P. The International Temperature Scale of 1990 (ITS 1990), Sévres, v. 27, p. 3-10, 1990.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL (UERGS). Geradores de Vapor. Disponível em: <<http://saudeetrabalho.com.br/download/gera-vapor.pdf>>. Acesso em: 03. jul. 2017.

VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA (VIM). Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados. 1ª edição, Rio de Janeiro, INMETRO, 2012.

WITTE, R. S.; WITTE, J. S. Estatística 7ª edição, Rio de Janeiro, LTC, 2005.