

ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA E VALIDAÇÃO DE UM MODELO DINÂMICO NÃO LINEAR PARA UM SECADOR SOLAR

VICTOR GONÇALVES CREMONEZ¹, DILE PONTAROLO STREMEL², JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS³, RICARDO JORGE KLITZKE⁴

¹ Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Avenida Lothário Meissner, 632, Jardim Botânico, Curitiba, Paraná, Brasil. Faculdade de Tecnologia de Curitiba – FATEC-PR, Itacolomi, 450, Portão, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: victor.cremonez@gmail.com; direcaoacademica@fatecpr.edu.br

² Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Avenida Lothário Meissner, 632, Jardim Botânico, Curitiba, Paraná, Brasil, E-mail: dile.stremel@gmail.com

³ Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Avenida Lothário Meissner, 632, Jardim Botânico, Curitiba, Paraná, Brasil, E-mail: mailjmatos.ufpr.br

⁴ Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Avenida Lothário Meissner, 632, Jardim Botânico, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: rjkkklitzke@gmail.com

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi estimar o coeficiente de transferência de massa e validar um modelo dinâmico não linear para um secador solar de madeira e biomassa. Para tal, foi construída uma estufa solar para secagem de madeira serrada e biomassa, com aproximadamente 1m³ de capacidade. Na estufa, foram secas tábuas de *Eucalyptus* spp.. Para a modelagem dinâmica foi proposto um balanço dinâmico em torno do material sólido, levando em conta a perda cinética da taxa de secagem em que esta depende do coeficiente de transferência de massa, parâmetro este que será ajustado levando em consideração a dinâmica do ambiente de secagem. Na otimização, foi utilizado o método dos mínimos quadrados não linear. Como resultado, foi possível elaborar um modelo dinâmico para a perda de umidade em relação ao tempo na secagem solar, bem como o coeficiente de transferência de massa. É possível concluir que o coeficiente de transferência de massa e os modelos encontrados podem ser utilizados para estimar os parâmetros de secagem em outras condições ambientais, como outra época do ano, outra cidade ou até outro país, melhorando assim as perspectivas do uso da secagem solar no meio rural.

Palavras-chave: taxa de secagem, secagem de madeira, secagem de biomassa.

ESTIMATION OF MASS TRANSFER COEFFICIENT AND VALIDATION OF A NON-LINEAR DYNAMIC MODEL FOR A SOLAR DRYER

ABSTRACT: The aim of this work was to estimate the mass transfer coefficient and to validate a dynamic non-linear model for a solar wood and biomass dryer. For this purpose, a solar dryer greenhouse was built to dry sawn wood and biomass, with approximately 1m³ of capacity. In the solar dryer, were dried boards of *Eucalyptus* spp.. For dynamic modeling, a dynamic balance around the solid material was proposed, taking into account the kinetic loss of the drying rate, which depends on the mass transfer coefficient, a parameter that will be adjusted taking into account the dynamics of the drying environment. in optimization, the nonlinear least squares method was used. As a result, it was possible to develop a dynamic model for the loss of moisture in relation to time in solar drying, as well as the mass transfer coefficient. It is possible to conclude that the mass transfer coefficient and the models found can be used to estimate drying parameters in other environmental conditions, such as: another time of the year, another city or even in another country, thus improving the prospects for the use of solar drying in rural areas.

Keywords: drying rate, wood drying, biomass drying.

1 INTRODUÇÃO

O setor industrial madeireiro impulsiona a economia nacional com um Produto Interno Bruto (PIB) setorial de R\$ 86,6 bilhões, representando 1,3% do PIB brasileiro e 6,9% do PIB industrial. A produção brasileira de madeira serrada em 2018 foi estimada em 9,1 milhões de m³, valor 4,2% superior à produção de 2017 e com esse desempenho, o Brasil ocupa o 8º lugar entre os principais países produtores de madeira serrada no mundo (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019). Para melhor utilização, em qualquer processo de transformação da madeira em produtos, a secagem adequada é a fase intermediária mais importante e que mais agrega valor ao produto final (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; SANTOS, 2002; HILL, 2006; BATISTA, 2012).

Observa-se na madeira sólida seca, um aumento nas suas propriedades mecânicas, isolamento térmico, elétrico e acústico, melhor trabalhabilidade em superfícies, aplicação de tintas e vernizes, favorece a colagem e a fixação de pregos e parafusos. Apresenta-se com maior estabilidade dimensional, maior proteção contra o apodrecimento causado por fungos e proteção contra alguns insetos xilófagos (KOLLMANN; CÔTE JUNIOR, 1968; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

A secagem da madeira é um processo que reduz a quantidade de umidade na madeira para que o material esteja em equilíbrio hidrotermal com o meio Ambiente. Este estado reduz tensões mecânicas de superfície entre a madeira e seu ambiente. Nessa condição, a madeira é dita ser estável. O desafio é obter condições adequadas que podem levar a uma distribuição homogênea do teor de umidade dentro da madeira. Nesse cenário, a correta estimativa e adequação das propriedades físicas se fazem cada vez mais presentes, requerendo continuamente procedimentos de investigação e controle dos produtos acabados, principalmente aspectos como processos envolvendo a secagem, que influencia a qualidade e durabilidade e fornece um produto final com características apropriadas. Os métodos de secagem conhecidos na literatura

são: “secagem ao ar livre, a baixa temperatura que compreende os pré-secadores e desumidificadores, secagem convencional, alta temperatura, secagem a vácuo, alta frequência, secagem por prensagem e secagem química”. Entretanto, os métodos mais utilizados são secagem ao ar livre e convencional (OLIVEIRA; SKAAR; WENGERT, 1982). A secagem em estufa solar vem sendo recomendada por diversos autores (SANTINI, 1981; HAQUE, 2002; BAUER, 2003; STANGERLIN, 2009) como alternativa de substituição dos métodos que apresentam elevados custos de investimento, manutenção e consumo energético. Algumas variáveis da secagem, como tempo de secagem, umidade final e taxa de secagem, podem variar dependendo da localização geográfica, espécie de madeira, tipo de estufa, clima e época do ano. Stangerlin (2009) demonstra que o tempo de secagem pode variar entre 8 e 218 dias, a umidade final entre 6% e 20% e a taxa de secagem entre 0,24 %/dia e 5,06%/dia.

De acordo com Gu et al. (2004) e Park et al. (2013), é importante manter um bom controle de todos os estágios do processo de secagem com a proposta de prevenir a ocorrência de aumento de defeitos, os quais não levam somente à redução do valor econômico da madeira serrada mas a um decréscimo em suas propriedades. Vários trabalhos, como o de Klitzke e Batista (2010), estudaram vários fatores na taxa de secagem, principalmente quanto à influência da velocidade de secagem em secadores convencionais na qualidade de espécies de eucaliptos analisando seus defeitos, no entanto, visando auxiliar na melhoria da informação e amplificação da influência de parâmetros de difícil estimativa experimental ainda se demanda muitos esforços em modelagem e otimização visando estimar e inferir propriedades de transferência de massa em secadores solares para estudos ampliados de outras variáveis não medidas na qualidade de secagem. Para auxiliar nesse aspecto, o modelo matemático é, sem dúvida, o modelo mais versátil e barato que um engenheiro pode usar, uma vez que diferentes variações nas características e entradas de um sistema podem ser analisadas sem nada ser construído. Sempre que se parte para a elaboração de um novo

modelo ou para a modificação de um já existente, consideram-se certos pressupostos e simplificações, de tal modo que os modelos raramente são exatos. A ideia não é produzir o modelo mais descritivo e compreensivo, mas sim produzir o modelo mais simples possível que incorpore os pressupostos do fenômeno em análise. Um dos grandes problemas da modelagem do processo de transferência de massa na secagem é justamente a definição do coeficiente convectivo, que serve para calcular o fluxo ou taxa de um certo soluto em uma dada interface conhecendo-se as concentrações na fronteira e no seio do fluido.

O coeficiente global de transferência de massa é uma propriedade intrínseca à transferência de massa no processo de secagem, o qual está relacionado com a taxa de água evaporada no processo e cujo estudo pode indicar as propriedades que limitam a secagem. O valor do coeficiente global de transferência de massa geralmente é estimado por equações empíricas validadas frente a dados experimentais da secagem de sólidos realizada tanto em camada delgada quanto em camada espessa (DEFENDI et al., 2013). Os coeficientes de transferência de calor e massa externos (convectivos) são usados para definir as condições de contorno na superfície de secagem, caracterizando a fronteira das equações de transferência de calor e massa de um modelo de secagem de madeira (TREMBLAY; CLOUTIER; FORTIN, 2000; PANG; SIMPSON; HASLETT, 2001). O intercâmbio de massa entre a madeira e seu meio ambiente é controlado por duas principais resistências: a resistência interna, medida pelo coeficiente de difusão, relacionado à geometria interna da madeira e afetado tanto pela temperatura como pelo teor de umidade e a resistência externa, medida pelo coeficiente de emissão superficial que inclui a resistência da camada limite do ar adjacente à superfície da madeira. A resistência externa é função das características do fluido, tais como a temperatura, velocidade do ar, viscosidade, densidade da madeira, teor de umidade e

condição da superfície. A soma dos dois componentes é chamada de resistência total. (MELLADO, 2007).

Neste trabalho é dada ênfase a um modelo contínuo, dinâmico, obtido aplicando-se o princípio da conservação e empregando-se propriedades de transferência de massa entre fases. Essa etapa prévia visa estimar o coeficiente de transferência de massa empregando dados experimentais dinâmicos para a madeira e, com esse dado, obter informações paramétricas para emprego em condições operacionais diferentes, possibilitando simular condições não monitoradas visando avaliar o desempenho do secador em termos de comportamento de variáveis não medidas, funcionando o modelo como um *softsensor*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

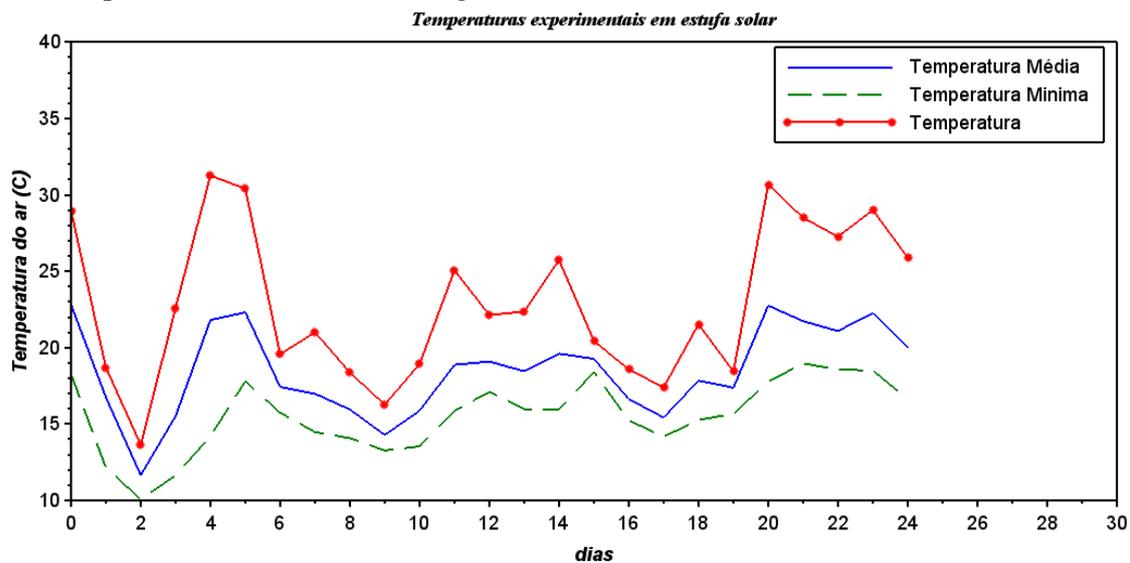
2.1 Experimentação

Para a secagem solar, foi construída uma estufa no modelo *greenhouse*, no pátio localizado ao lado do prédio de Ciências Florestais e da Madeira (CIFLOMA) na Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná. O protótipo teve orientação de sua face frontal ao norte para melhor aproveitamento da radiação solar durante o dia e suas dimensões são 2,65 x 3,30 x 1,45 x 3,00 m (largura x comprimento x altura da parede norte x altura da parede sul), resultando numa capacidade de aproximadamente 1m³ de madeira. Seguindo as orientações de Viehbeck (1999), a estufa possui uma inclinação de 25°, a qual deve ser igual à latitude da Cidade, que em Curitiba é 25° 25' 40''. Esse valor é utilizado para uma melhor absorção da radiação solar durante todo o ano. O período das duas secagens foi entre outubro e novembro de 2015. O empilhamento no ciclo completo e no híbrido foi de sete filas e nove colunas de tábuas, centralizadas perpendicularmente à estufa e com passagem de ar perpendicular as fibras, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1. Disposição das Pilhas na secagem solar

Na figura 2 pode-se observar as temperaturas medidas obtidas a partir de Cremonez (2016). A partir dos dados, ajustou-se um polinômio de quarta ordem em função do

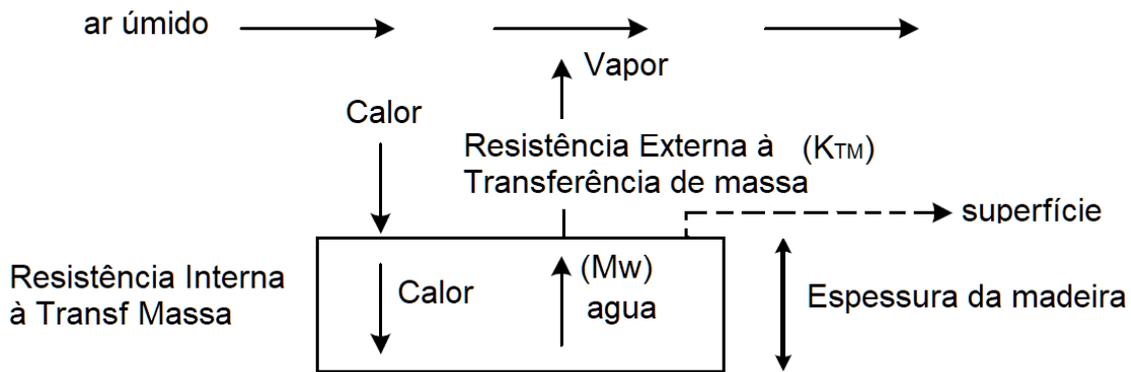
tempo, visando alimentar o modelo dinâmico para obter uma resposta contínua no intervalo de integração e melhorar a estabilidade do método numérico.

Figura 2. Temperatura Monitorada ao longo de 25 dias

2.2 Modelagem dinâmica

Para se propor um balanço de massa, partiu-se do balanço dinâmico em torno do material sólido, levando em conta a perda cinética da taxa de secagem em que esta depende do coeficiente de transferência de massa, parâmetro este que será ajustado levando em consideração a dinâmica do ambiente de secagem.

O processo de secagem de um material deve-se à transferência simultânea de calor e de massa, ou seja, a umidade é retirada do sólido pelo fornecimento de calor a este por meio de um meio secante, normalmente um gás, que apresenta menor concentração de umidade em relação à concentração de equilíbrio. A tendência é o sistema entrar em equilíbrio mássico e térmico. O esquema desse processo é mostrado na Figura 3.

Figura 3. Esquema dos Processos de Transferência de Calor e Massa durante a Secagem

Para se propor um modelo visando estimar o coeficiente de transferência de massa, partiu-se de um balanço de massa de água em torno do material sólido que corresponde a tábuas empilhadas (Figura 1). Admitiu-se que no sólido, o acúmulo de massa de água na madeira é igual à quantidade evaporada, representada pela equação 1:

$$\frac{dM_w}{dt} = -M_{ss} N_w a_s \quad (1)$$

Onde a_s é a interfacial específica para transferência de massa (cm), M_{ss} é a massa de sólido seco e N_w é o fluxo mássico de água que sai do sistema para o ar ($g_w g_{ss}^{-1} cm s^{-1}$) sendo este último caracterizado pela equação 2:

$$N_w = K_{TM} (X_s - X_e) \quad (2)$$

Em que X_s é o teor em base seca ($g_w g_{ss}^{-1}$), X_e é o teor equilíbrio ($g_w g_{ss}^{-1}$) e K_{TM} é o coeficiente de transferência de massa cuja unidade ($cm s^{-1}$).

A equação 3, resultado da substituição da equação 2 em 1, é demonstrada abaixo:

$$\frac{dM_w}{dt} = -M_{ss} K_{TM} a_s (X_s - X_e) \quad (3)$$

A massa de água na madeira (M_w) é dada pela umidade da madeira (X_s) em base seca vezes a massa seca da madeira (M_{ss}), conforme equação 4:

$$M_w = X_s M_{ss} \quad (4)$$

Substituindo a equação 4 na equação 3, obtém-se a equação 5:

$$\frac{[X_s M_{ss}]}{dt} = -M_{ss} K_{TM} a_s (X_s - X_e) \quad (5)$$

Como a massa do sólido seco é constante com o tempo, segue-se a equação 6:

$$\frac{dX_s}{dt} = -K_{TM} a_s (X_s - X_e) \quad (6)$$

A umidade de equilíbrio X_e pode ser calculada conforme descrito em Baraúna e Oliveira (2009), onde os parâmetros K_1 , K_2 , K_3 e W são função da temperatura do ar $T(^{\circ}C)$.

As equações 8, 9 e 10 empregadas no modelo para X_e (equação 11) são:

$$X_e = \left[\frac{K_1 K_2 h}{1 + K_1 K_2 h} + \left(\frac{K_2 h}{1 - K_2 h} \right) \right] \left(\frac{1800}{W} \right) \quad (7)$$

Em que:

$$K_1 = 4,737 + 0,04773T - 0,00050123 T^2 \quad (8)$$

$$K_2 = 0,70594 + 0,001698T - 0,00005553 T^2 \quad (9)$$

$$W = 223,374 + 0,69309T - 0,0185 T^2 \quad (10)$$

A variável h é a pressão relativa, ou a relação entre a pressão de vapor d'água no ar e a pressão de vapor que apresentaria a água pura na mesma temperatura (LOPES; BORGES, 2009). Pode ser expressa pela equação 11, onde U_R é denominada umidade relativa em porcentagem:

$$h = U_R / 100 \quad (11)$$

A temperatura do ar foi obtida ajustando-se um polinômio em função do tempo de monitoramento da variável, o que permitirá ampliar a simulação para condições experimentais além das obtidas. A temperatura do ar é uma variável meteorológica e para estimar os parâmetros, a função $T(t)$ (equação 12) permite que os parâmetros sejam corrigidos no modelo dinâmico para cada tempo discreto, contribuindo para uma melhor estimativa do coeficiente de transferência K_{TM} .

$$T(t)=b_0+b_1t+b_2 t^2+b_3 t^3+b_4 t^4 \tag{12}$$

2.3 Otimização

Formular o problema é talvez o passo mais crucial na otimização. A formulação requer a identificação dos elementos essenciais de uma abordagem conceitual ou verbal e organizá-los em um método matemático, ou seja, escolher a função objetiva (critério a ser minimizado ou maximizado) e o modelo matemático (restrições) (EDGAR; HIMMELBLAU; LASDON, 2001). Um grande número de modelos matemáticos contêm equações diferenciais. Assim, juntamente com a estimativa de parâmetros deve-se resolver, na maior parte das vezes numericamente, a equação ou sistema de equações diferenciais em causa. O modelo matemático que é fornecido pelo modelador deve pertencer a uma das seguintes categorias: equações diferenciais ordinárias com valores iniciais, equações diferenciais algébricas, equações diferenciais unidimensionais com derivadas parciais dependentes do tempo, equações diferenciais unidimensionais com derivadas parciais algébricas. Neste trabalho, a otimização está relacionada a mínimos quadrados não linear que consiste na equação 13:

$$\underset{x \in \mathbb{R}^n}{\text{minimizar}} f(x) \equiv \frac{1}{2} \|r(x)\|_2^2 \tag{13}$$

Em que $x=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$ é o vetor dos parâmetros do sistema especial a tratar. Um problema básico da matemática consiste em determinar os parâmetros desconhecidos a partir de um conjunto de m medições das variáveis, que para verificarem o modelo, onde

$m > n$, e a função residual $r : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ é dada por $r(x) = M(x, t) - \theta$ em que θ representa as observações.

A estratégia para resolver o problema consiste em aplicar o método de Newton com procura unidimensional, aproximando a função resíduo até o termo linear, neste caso a parte da matriz de derivadas de segunda ordem pode ser suprimida e a aproximação de $r(x)$ centrada em x_k resulta na equação 14:

$$L_k(x)=r(x_k)+A(x_k)(x-x_k) \tag{14}$$

O problema então torna-se:

$$\underset{x \in \mathbb{R}^n}{\text{minimizar}} f(x) \equiv \frac{1}{2} \|L_k(x)\|_2^2 \tag{15}$$

A solução para a equação 14 aplicando o critério dado pela equação 15 exige manipulação matricial resultando na equação 16:

$$\left(A(x_k)^T A(x_k) \right) \Delta_k = -A(x_k)^T r(x_k) \tag{16}$$

O cálculo das equações variacionais é necessário para a construção das matrizes do Jacobiano (equação 17) sendo o número de equações do modelo (i), os parâmetros (n) e observações (m):

$$A(x_k) = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_{i,1}}{\partial x_{k1}} & \dots & \frac{\partial y_{i,1}}{\partial x_{kn}} \\ \frac{\partial y_{i,m}}{\partial x_{k1}} & \dots & \frac{\partial y_{i,m}}{\partial x_{kn}} \end{pmatrix} \tag{17}$$

A solução iterativa para cada conjunto de observações ocorre conforme a equação 18, de acordo com o método de Newton:

$$x_{k+1} = x_k - \left(A(x_k)^T A(x_k) \right)^{-1} A(x_k)^T r(x) \tag{18}$$

Obtendo a equação variacional e rearranjando a ordem de diferenciação da equação 6, tem-se a equação 19:

$$\frac{\partial}{\partial K_{TM}} \left(\frac{dX_s}{dt} \right) = \left(\frac{\partial g}{\partial K_{TM}} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial X_s}{\partial K_{TM}} \right) \tag{19}$$

Derivando a equação 6, resulta na equação 20:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial X_s}{\partial K_{TM}} \right) = -K_{TM} a_s \frac{\partial X_s}{\partial K_{TM}} - X_s a_s + X_e a_s \quad (20)$$

Chamando: $\frac{\partial X_s}{\partial K_{TM}} = y_2$ e $X_s = y_1$
podemos obter a equação 21:

$$\frac{dy_2}{dt} = -K_{TM} a_s y_2 - y_1 a_s + X_e a_s \quad (21)$$

$$K_{TM_{k+1}} = K_{TM_k} - (A_{m,1}^T A_{m,1})^{-1} (A_{m,1}^T [(y_1) - \theta]_{m,1}) \quad (22)$$

Onde: $A_{m,1}^T = \left(\frac{dy_{2,1}}{dt} \quad \dots \quad \frac{dy_{2,m}}{dt} \right) r(x_k)_{m,1} = \begin{pmatrix} y_{1,1} - \theta_1 \\ \vdots \\ y_{1,m} - \theta_m \end{pmatrix}$

As soluções numéricas foram obtidas no software livre Scilab.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo abaixo com novas variáveis mostra um sistema de EDO's o qual foi resolvido numericamente:

$$\frac{dy_1}{dt} = -K_{TM} a_s (y_1 - X_e) \quad (23)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = -K_{TM} a_s y_2 - y_1 a_s + X_e a_s \quad (24)$$

Onde:

$$X_e = X_e [K_1(T(t)), K_2(T(t)), W(T(t))] \quad (25)$$

Sendo assim, teremos duas equações a serem integradas simultaneamente, as equações 6 e 21, onde as condições iniciais serão para $t_o(0) - y_1(0) = 0,718$ e $y_2(0) = 0$

Neste caso, como temos uma constante e m observações temporais, o processo demanda a seguinte fórmula de recorrência:

Conforme os valores de temperatura poderemos ter vários parâmetros de transferência de massa, desta forma podemos avaliar o efeito da temperatura na variação deste coeficiente. Desta forma os dados experimentais do trabalho de Cremonez (2016) foram ajustados a equação (26), os dados estão na tabela 1. A dificuldade no ajuste para temperatura média reflete no fato das condições meteorológicas serem imprevisíveis, o que dificulta obter um modelo contínuo significativo.

$$T(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 \quad (26)$$

Tabela 1. Resultados para o Ajuste Polinomial para as Temperaturas

T do ar (°C)	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
$T(t)$ Média	19,041842	-0,627826	0,069519	-0,002961	0,000057
$T(t)$ Máxima	22,906221	0,4871315	-0,153774	0,0101607	-0,0001742
$T(t)$ Minima	14,865663	-0,814506	0,1589556	-0,009272	0,0001801

A umidade experimental média, obtida do trabalho de Cremonez (2016) ao longo do tempo, também foi ajustada por um polinômio de quarta ordem, traduzido na equação 27:

$$U(\%) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 \quad (27)$$

O ajuste polinomial a um conjunto de dados experimentais, para o modelo, resultou na tabela 2.

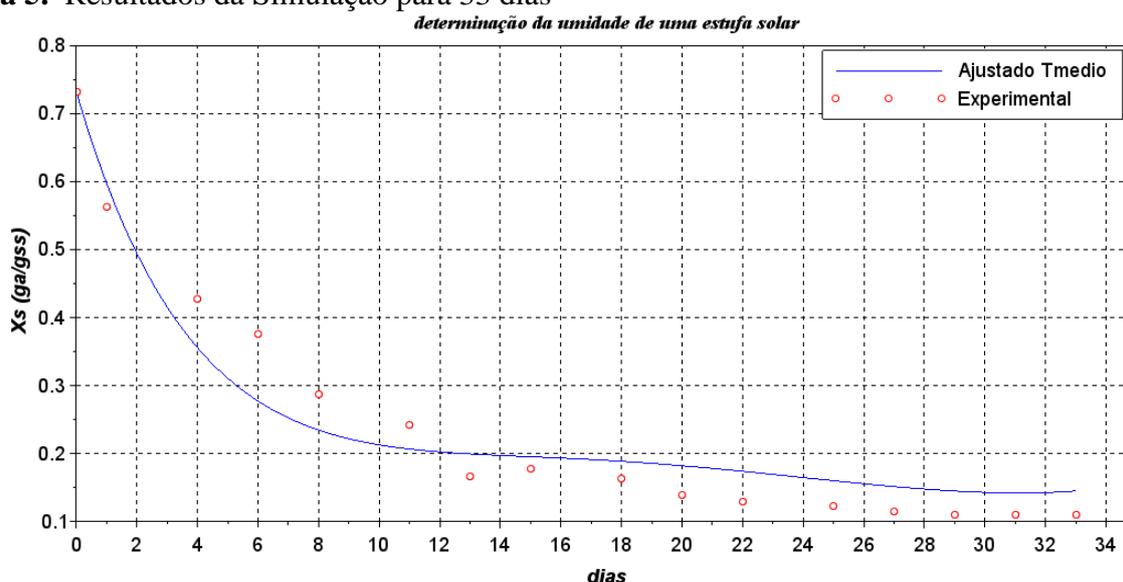
Tabela 2. Resultados para o Ajuste Polinomial para a Umidade

T do ar (°C)	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4
U(%) Média	78,24603	0,5271168	0,159109	-0,0133716	0,0002506

A simulação computacional para o problema de estimativa do coeficiente de transferência de massa empregando todas as observações temporais se encontra na Figura 5, neste caso plotou-se o valor simulado

considerando-se a temperatura média contra os dados experimentais. Os demais modelos não foram plotados, vistos terem desempenho similar e as curvas ficariam sobrepostas.

Figura 5. Resultados da Simulação para 33 dias



Legenda: Xs: gramas de água por gramas de sólido.

Os valores paramétricos e estatísticos obtidos da modelagem se encontram na tabela 3. Verifica-se que os modelos conseguem explicar acima de 92 % os dados experimentais e uma análise da variância mostra que p-valor é

menor que 0,05, validando o modelo obtido após o ajuste do parâmetro de transferência de massas, mesmo quando considera-se as equações algébricas não lineares aproximadas para os perfis de temperatura da tabela 1.

Tabela 3. Resultados dos Parâmetros

Parâmetro	Modelo T(t) médio	Modelo T(t) máxima	Modelo T(t) mínimo
$K_{TM}(m/s)$	$5,6 \times 10^{-6}$	$5,10 \times 10^{-6}$	$5,80 \times 10^{-6}$
R^2	0,94	0,94	0,92
p-valor	$6,02 \times 10^{-10}$	$1,83 \times 10^{-10}$	$3,10 \times 10^{-9}$
Fcalc	219,35	261,96	170,79

Quando comparado aos coeficientes encontrados experimentalmente por Mellado (2007), que estudou os modelos de transferência de calor e massa em um secador convencional, os coeficientes encontrados nesse estudo são menores. Isso pode estar relacionado ao fato de que as temperaturas

utilizadas em secadores convencionais podem ser maiores e contínuas, enquanto que em um secador solar, a secagem ocorre sem alguns parâmetros de controle e primordialmente ao dia.

Os resultados encontrados para estimativa dos coeficientes de transferência de

massa, na secagem solar de madeira serrada são importantes para que possa ser estimada a taxa de secagem e a perda do teor de umidade em outras condições ambientais, ou até mesmo, em outra cidade ou país. É importante também reiterar que as rotinas de cálculos criadas podem ser utilizadas em estudos posteriores.

4 CONCLUSÕES

Nesse estudo foi possível propor e validar um modelo dinâmico para a secagem solar, bem como, obter o coeficiente de

transferência de massa. Tal modelo ajuda a entender os fenômenos relacionados a esse tipo de secagem, e também a otimizá-lo. A rotina de cálculos criada pode ser reproduzida em estudos posteriores. Para futuros estudos é sugerido incluir a variável velocidade do ar, para explicar o fenômeno com maior precisão.

5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem a ajuda da CAPES, da UFPR, do DETF, bem como, da FATEC-PR.

6 REFERÊNCIAS

- BARAÚNA, E. E. P.; OLIVEIRA, V. S. Umidade de equilíbrio da madeira de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz & Pav.) e tauari vermelho (*Cariniana micrantha* Ducke) em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, n. 1, p. 91-95, mar. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0044-59672009000100009>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672009000100009. Acesso em: 27 jul. 2020
- BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro VAP HolzSysteme®**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/29709/R%20-%20T%20-%20DJEISON%20CESAR%20BATISTA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 jul. 2020
- BAUER, K. **Development and Optimisation of a Low-Temperature Drying Schedule for *Eucalyptus grandis* (Hill) ex Maiden in a Solar-Assisted Timber Dryer**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Institut für Agrartechnik in den Tropen Und Subtropen, Universität Hohenheim, Hohenheim, 2003. Disponível em: <https://d-nb.info/982098324/34>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- CREMONEZ, V. G. **Estufa solar para secagem de madeira serrada: uso de placas planas fotovoltaicas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/45775/R%20-%20D%20-%20VICTOR%20GONCALVES%20CREMONEZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- DEFENDI, R. O.; SPANHOL, A.; MARQUES, G. S.; LUZ, G. R.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. Validação de um modelo matemático para a estimativa do Coeficiente global de transferência de massa na secagem de soja em camada delgada. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 36., 2013, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: Edufal, 2015. v. 4, p. 357-366. Disponível em: <http://evento.ufal.br/enemp2013/anais/ANAIS%20ENEMP%202013%20-%20VOLUME%201.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2020.

- EDGAR, T. F.; HIMMELBLAU, D. M.; LASDON, L. S. **Optimization of chemical processes**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook**: wood as an engineering material. 100. ed. Madison: USDA, 2010.
- GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985.
- GU, H; YOUNG T. M.; MOSCHLER W. W.; BOND B. H. Potential sources of variation that influence the final moisture content of kiln-dried hardwood lumber. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 54, n. 11, p. 65-70, nov. 2004. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/25152>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- HAQUE, M. N. **Modelling of solar kilns and the development of an optimised schedule for drying hardwood timber**. 2002. Tese (Doutorado em Philosophy) – Department Of Chemical Engineering, The University of Sydney, New South Wales, 2002. Disponível em: <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/581?show=full>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- HILL, C. A. S. **Wood modification**: chemical, thermal and other processes. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006.
- KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade de secagem convencional da madeira de Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 97-105, mar. 2010. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr85/cap09.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- KOLLMANN, F. E. P; CÔTE JUNIOR, W. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, 1968.
- LOPES, C. H.; BORGES, M. T. M. R. **Introdução à tecnologia agroindustrial**. São Carlos: Edufscar, 2009. (Série Apontamentos).
- MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/11594/ROZAS-24-08-2007.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- OLIVEIRA, L.; SKAAR, C.; WENGERT, E. Solar and air lumber drying during winter in Virginia. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 32, n. 1, p. 37-44, 1982.
- PANG, S.; SIMPSON, I.; HASLETT, T. Cooling and steam conditioning after high-temperature drying of *Pinus radiata* board: experimental investigation and mathematical modelling. **Wood Science and Technology**, Heidelberg, v. 35, n. 6, p. 487-502, dez. 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-001-0124-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-001-0124-2>. Acesso em: 27 jul. 2020
- PARK, J. H.; PARK Y.; HAN Y.; CHOI J. W.; CHOI I. G.; LEE J. J.; YEO H. Effect of Outer Surface Sealing Treatment on the Reduction of Surface Check Occurrence During the Drying of Center-Bored Round Timber. **Drying Technology**, New York, v. 32, n. 2, p. 236-243, dez. 2013.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2013.821995>. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373937.2013.821995>. Acesso em: 27 jul. 2020

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **IBÁ Relatório 2019**. São Paulo: Studio 113, 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2020.

SANTINI, E. J. **Secagem de madeira serrada em estufa solar e sua comparação com os métodos convencionais**. 1981. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1981. Disponível em:
<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/25228/D%20-%20SANTINI%2c%20ELIO%20JOSE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 jul. 2020.

SANTOS, G. R. V. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden)**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. Disponível em:
<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11149/tde-01082002-163939/publico/gilson.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2020.

STANGERLIN, D. M. **Avaliação do uso de estufa solar para secagem de madeira serrada de eucalipto**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009. Disponível em:
<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8640/DIEGOMARTINSSTANGERLIN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 jul. 2020.

TREMBLAY, C.; CLOUTIER, A.; FORTIN, Y. Determination of the effective water conductivity of red pine sapwood. **Wood Science and Technology**, Heidelberg, v. 34, n. 2, p. 109-124, jun. 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s002260000036>. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s002260000036>. Acesso em: 27 jul. 2020

VIEHBECK, P. **Lo básico del secado de maderá con energía solar**. Eschborn: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, 1999.