

Modelo matemático logístico para aquecimento de toras de *Eucalyptus grandis* W. Hill com vapor e água quente

Mathematical model for heating of logs of logistic *Eucalyptus grandis* W. Hill with steam and hot water

Ademilson CONEGLIAN [1](#); Elias Taylor Durgante SEVERO [2](#); Wagner Roberto BATISTA [3](#); Ismael Martins PEREIRA [4](#); Ivana da Silva GOMES [5](#)

Recebido: 10/08/2017 • Aprovado: 07/09/2017

Conteúdo

- [1. Introdução](#)
 - [2. Metodologia](#)
 - [3. Resultados e Discussão](#)
 - [4. Conclusões](#)
- [Referências bibliográficas](#)

RESUMO:

O objetivo deste estudo foi obter um modelo matemático logístico que representa o melhor aquecimento de toras de *Eucalyptus grandis* em função do diâmetro e do tempo das toras nos tratamentos térmico a vapor e água quente. Para tanto, foram coletadas 30 toras de 6 árvores aos 32 anos de idade provenientes do Horto Florestal de Manduri-SP, Brasil. As classes diamétricas das toras foram de 25 + 30 cm, 30 + 35 cm, 35 + 40. Em cada uma das toras foram inseridos três termopares com profundidades de 1/3 do raio, 2/3 do raio e próximo ao centro. Foram utilizadas 15 toras tratadas termicamente com vapor a 85°C e 100% de umidade relativa, e 15 toras aquecidas com água quente à 85°C até o termopar atingir uma temperatura de 80°C na posição de 50mm de raio. Conclui-se que no modelo matemático ajustado obteve-se um comportamento logístico nos tratamentos térmicos a vapor e água quente, apresentando um consumo ideal de energia e viabilidade técnica no processo de aquecimento de toras.

Palavras-chave: Transferência de calor; termopares; consumo energético

ABSTRACT:

The aims of this study was to obtain a mathematical logistics model that represents the best heating of logs of *Eucalyptus grandis* in function of the diameter and the length of the logs in the thermal treatments with steam and hot water. To this end, were collected 6 logs 30 trees to 32 years of age, from the Horto Florestal de Manduri-SP, Brazil. Diameter classes of logs were 25 + 30 cm, 30 + 35 cm, 35+ 40 cm. In each of the logs were inserted three thermocouples with depths of 1/3, of the radius, 2/3 of the third beam, near the center thereof. Were used 15 heat-treated logs with steam at 85°C and 100% relative humidity, and 15 logs heated with hot water to the thermocouple reach 85° C of temperature at position 50 mm radius. It is concluded that the mathematical model set obtained a logistic behavior in the treatments steam and hot water, presents an optimal consumption of energy e technical feasibility in heating process of logs.

Keywords: Heat transfer wood, thermocouples, energy consumption

1. Introdução

Segundo a FAO (2014), as florestas plantadas no mundo cobrem 264 milhões de hectares e sua expansão é da ordem de 5 milhões de hectares/ano em média. Em 2015 o Brasil totalizou 7,8 milhões de hectares de florestas plantadas para fins industriais, representando um crescimento de 0,8% em relação ao ano de 2014, sendo 5,6 milhões de hectares de eucalipto, 1,6 milhões de hectares de pinus, 0,59 milhão de hectares com acácia, teca, seringueira e paricá (IBÁ, 2016).

A utilização do gênero *Eucalyptus spp.* para laminação foi sugerida por diversos autores (ALMEIDA, BORTOLETTO JÚNIOR e JANKOWSKY, 2004; GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2009; CONEGLIAN et al., 2009a; IWAKIRI et al., 2012). Para utilização de *Eucalyptus spp.* na laminação, o tempo de aquecimento da tora depende principalmente do diâmetro, pois com o aumento do diâmetro das toras proporciona um maior tempo de plasticização da madeira após a temperatura pré-estabelecida (FEIHL e GODIN, 1970 e LUTZ, 1974). A determinação da plasticização da lignina foi reportada por Quirino e Vale (2002) por meio da análise termogravimétrica e calorimétrica diferencial, encontrado uma temperatura de 82°C para a madeira de *Eucalyptus grandis*, no estado verde.

O tempo de aquecimento de toras de *Eucalyptus spp.* foi estudado por Steinhagen et al. (1980); Calonego e Severo (2005); Coneglian et al. (2009a, 2009b) e Coneglian et al. (2013) os quais salientaram a necessidade da realização de estudos específicos sobre o tempo de aquecimento de toras e tratamentos térmicos, visando definir, com exatidão, os limites de tempo, temperatura de aquecimento real e calculado e consumo energético. Esses estudos foram conduzidos por Coneglian et al. (2009b), descrevendo o comportamento das temperaturas dos toretes de *Eucalyptus grandis* durante o aquecimento em água quente à 85°C de temperatura. Utilizou-se um modelo matemático comparativo na determinação do tempo de vaporização de toras, proposto por Steinhagen et al. (1980), no qual subestima os tempos reais necessários de vaporização do material, perfazendo-se necessário elaboração de um modelo aplicado para condição vapor. Esse modelo matemático proposto foi definido por Coneglian et al. (2013), através do processo de aquecimento com vapor a 85°C de temperatura em toras de *Eucalyptus grandis* com diâmetro entre 25 á 40 cm. Esse modelo matemático logístico apresentou-se viável na aplicação do processo de aquecimento de toras, requerendo novos estudos para a determinação de um modelo matemático único, que determine o tempo real de vapor e água quente em toras de *Eucalyptus grandis* em função do diâmetro e otimização do consumo energético do sistema. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi estudar a aplicação de um modelo matemático logístico no aquecimento de toras de *Eucalyptus grandis* em função do diâmetro e do tempo de permanência para os tratamentos térmicos a vapor e água quente.

2. Metodologia

Para a realização deste estudo foram utilizadas toras de *Eucalyptus grandis* com 32 anos de idade e um DAP médio de 39,0 cm entre os indivíduos. As amostras são provenientes do Horto Florestal de Manduri, localizado no Município de Manduri/SP, pertencente ao Instituto Florestal do Estado de São Paulo. O talhão utilizado apresentava uma área de 2,2 hectares com espaçamento de 3,0 m x 2,0 m, realizados três (3) desbastes seletivos. Foram coletadas amostras de 10 (dez) árvores escolhidas aleatoriamente dentro do povoamento. Destas, foram seccionadas 5 toras por classe diamétrica compreendida entre 25 + 30 cm, 30 + 35 cm, 35 + 40 cm, totalizando 15 toras por tratamento térmico. Cada tora foi traçada a 1,4m de comprimento para evitar rachaduras, e aneladas a 15 cm de cada uma das extremidades a uma profundidade de 1/3 do raio, conforme a metodologia proposta por Sales (1986) e Kubler (1987). O comprimento final das toras foi de 1,10m após o descarte da região anelada. Entre as toras foram retirados discos de 50 mm de espessura, para a determinação do teor de umidade e da massa específica básica do material. A massa específica básica foi determinada pelo método de pesagem através da Equação 1.

$$Meb = \frac{Ms}{Msaturada - Msaturada \cdot imersa} \quad (1)$$

Sendo:

Meb = massa específica básica, g/cm³;

Ms = massa seca(g) em estufa a 103 ± 2 °C até o peso constante, g;

$Msat$ = massa saturada, g;

Msi = massa saturada imersa, g.

O teor de umidade inicial com base em massa seca foi determinado pelo método da estufa e através do

uso da Equação 2.

$$U\% = \frac{Mu - Ms}{Ms} * 100 \quad (2)$$

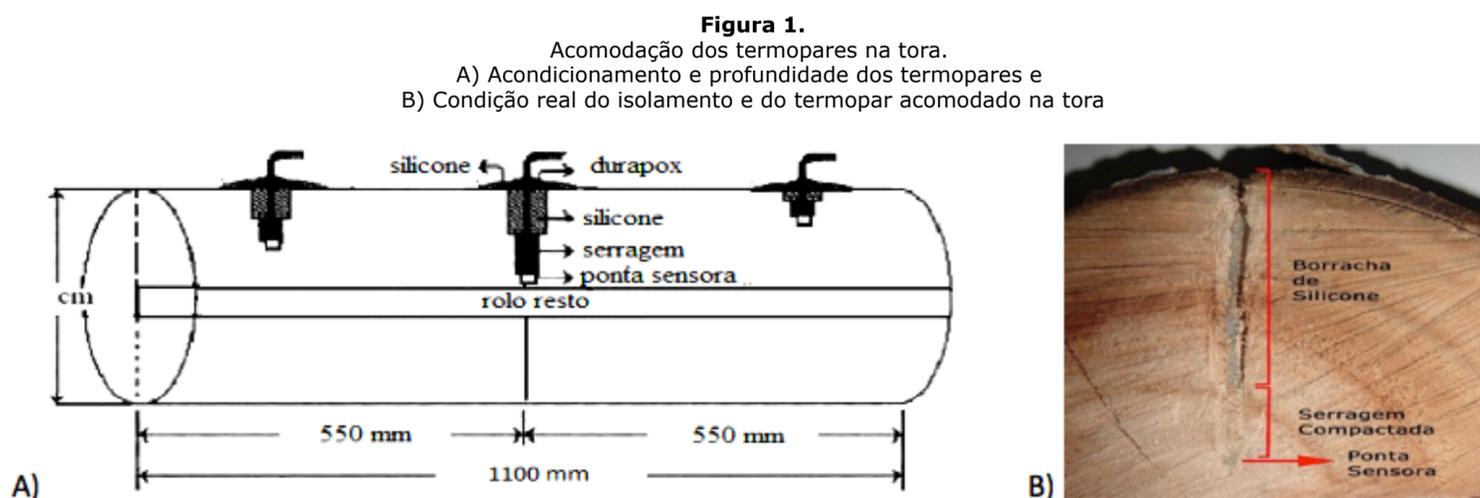
Sendo:

$U\%$ = Teor de umidade da madeira, %;

Mu = Massa úmida, g;

Ms = Massa seca em estufa a 103 ± 2 °C até peso constante, g.

Para a determinação do tempo de aquecimento de toras em vapor e água quente foram realizados furos nas toras para a perfeita acomodação dos termopares. Cada tora recebeu 3 (três) termopares, sendo um na profundidade equivalente a superfície da tora, outro acomodado próximo ao rolo resto e outro numa posição intermediária entre os citados anteriormente, conforme a Figura 1.



Depois a instalação dos termopares nos orifícios, os mesmos foram vedados com camadas de serragem retirada do próprio furo, resina epóxi, isolante térmico, e a película de silicone resistente a elevadas temperaturas e umidade, e também ao choque mecânico. Cada material foi aplicado durante um intervalo de 24 horas, permitindo dessa maneira, a secagem e fixação dos isolantes na madeira. Durante todo o processo de tratamento térmico com água quente e vapor analisou-se o comportamento da temperatura pelos termopares acoplados a uma base coletora de dados (Datalogger Micrologger CR10).

As toras foram submetidas aos tratamentos térmicos vapor e a água quente à 85°C até que a superfície do rolo resto atingisse 80°C. Para tanto, foi utilizado um tanque de aço pertencente ao Laboratório de Laminação (USP-ESALQ) com as seguintes dimensões: 1,49m x 1,18m x 84cm, equivalente a 1,53m³, sendo a fonte geradora de calor por resistências elétricas recomendado. A temperatura de aquecimento apropriada para *Eucalyptus grandis* foi de 80°C, por apresentar uma massa específica de 0,65 g/cm³, seguindo a recomendação de Lenth e Kamke (2001) e Quirino e Vale (2002), determinada por análise termogravimétrica e calorimétrica diferencial. A madeira *Eucalyptus grandis* no estado verde apresenta uma temperatura de transição viscoelástica à 82°C, já para o tempo de aquecimento seguimos a metodologia proposta por Coneglian et al. (2009b) e Coneglian et al. (2013). Os modelos matemáticos ajustados foram realizados através do software SAS – Statistical Analysis System (SAS, 2011).

3. Resultados e Discussão

A massa específica de *Eucalyptus grandis* foi de 0,587 a 0,634 g/cm³, com um valor médio de 0,603 g/cm³ entre as classes de diâmetro 25 + 30 cm, 30 + 35 cm e 35 + 40. A homogeneidade desta propriedade física é importante, pois permitiu estabelecer uma temperatura ótima de aquecimento à 80 °C, conforme estudos realizados por Lutz (1974); Quirino e Vale (2002); Coneglian et al. (2009) e Coneglian et al. (2013).

Para determinação do tempo de aquecimento das toras de *Eucalyptus grandis*, nas classes de diâmetros de 25 + 30 cm, 30 + 35 cm, 35 + 40 cm com profundidade até o rolo-resto 50mm de raio, à 85 °C de temperatura, foi ajustado um modelo logístico único que representa o tratamento térmico à vapor e água quente Equação 3.

$$\theta = \frac{a}{1 + e^{-bT+c}} \quad (3)$$

Sendo:

θ = Temperatura desejada;

T = Tempo estimado

a = Constante da temperatura final desejada para o modelo logístico;

b = Constante, calculada em função da análise de regressão para cada classe de diâmetro;

c = Constante estimada da temperatura inicial para o modelo logístico;

De acordo com o modelo logístico apresentado na Equação (3) foram obtidos os valores dos parâmetros a , b e c através de procedimentos não lineares de ajuste. Considere cada classe de diâmetro em separado e seus respectivos tratamentos térmicos. Desse modo, fez-se à suposição de que os parâmetros poderiam ser todos diferentes e, através de modelos encaixados, foram testados os ajustes de modo a reduzir o número de parâmetros envolvidos. Assim, os valores dos parâmetros a serem substituídos no modelo logístico para o tratamento térmico a vapor e água quente estão representados na Tabela 1.

Tabela 1

Valores das constantes geradas em função da análise de regressão para vapor e água quente.

Classe de diâmetro	Constante a Vapor*/Água Quente	Constante b Vapor*/Água Quente	Constante c Vapor*/Água Quente
25 - 30cm	$a_1^* = 82,2156$ $a_1 = 92,6529$	$b_1^* = 0,00433$ $b_1 = 0,0022$	$c_1^* = 1,4777$ $c_1 = 1,6051$
30 - 35cm	$a_2^* = 82,2156$ $a_2 = 92,6529$	$b_2^* = 0,00351$ $b_2 = 0,00232$	$c_2^* = 1,4777$ $c_2 = 1,6051$
35 - 40cm	$a_3^* = 82,2156$ $a_3 = 92,6529$	$b_3^* = 0,002535$ $b_3 = 0,00284$	$c_3^* = 1,4777$ $c_3 = 1,6051$

Sendo: Letra a* - Tratamento térmico a vapor; Letra a - Tratamento térmico em água quente.

Na condição dos valores de b_1 , b_2 , b_3 além de não serem considerados iguais estatisticamente, conclui-se que mesmo os termopares acoplados na mesma classe de diâmetro não atingiram 80 °C ao mesmo tempo em ambos os tratamentos térmicos. Isso é devido à quantidade de massa necessário para que o fluxo de calor eleve 1°C. Ou seja, na mesma classe de diâmetro existem variações nas toras como, por exemplo: classe de diâmetro de 25 - 40cm, foram utilizadas toras de diâmetros entre 26,5 cm a 39,8 cm. Essa diferença de massa influencia diretamente na condução de calor sobre as toras, conseqüentemente ocorre uma diferença de tempo para atingir a temperatura desejada. Portanto, essa diferença faz com que o b_1 , b_2 , b_3 , não sejam considerados iguais, como demonstrado na Figura 2 e 3.

Figura 2

Modelo matemático ajustado para o tratamento térmico a vapor, em função do tempo real monitorado e o tempo estimado, sob temperatura e profundidade 50mm do rolo-resto.

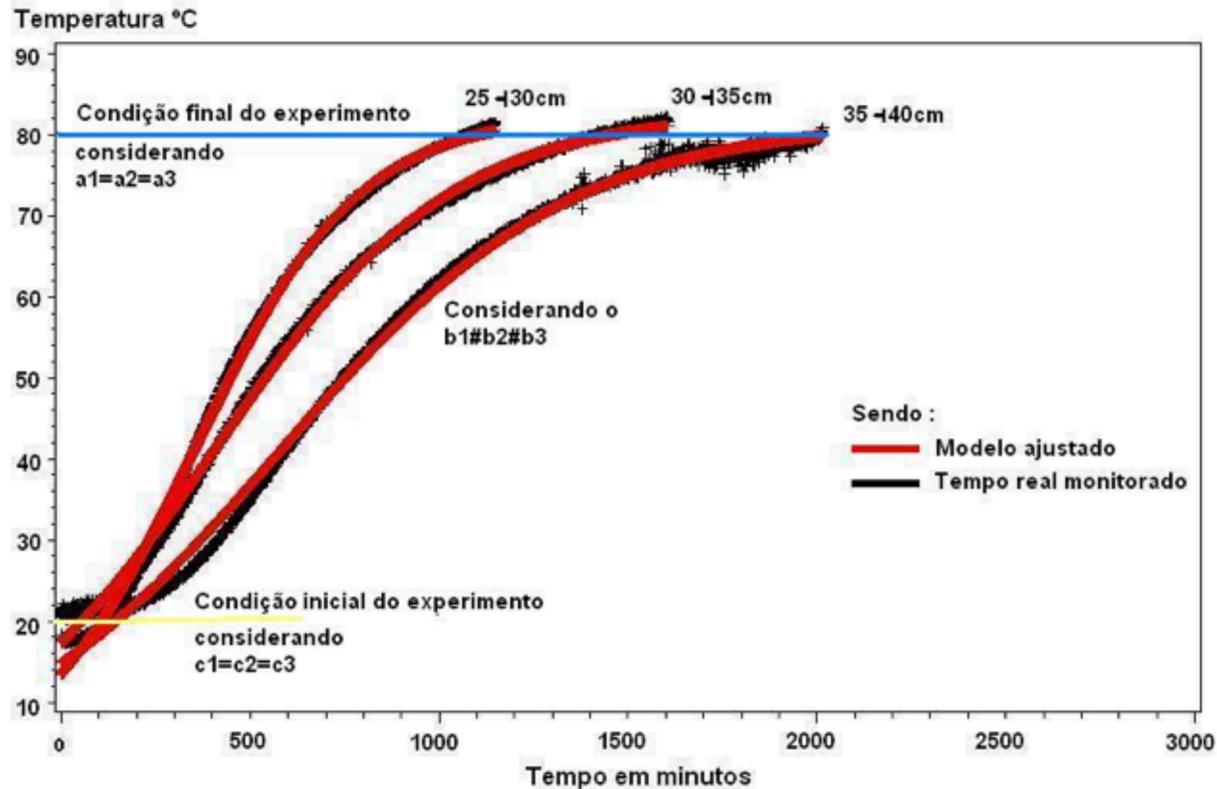
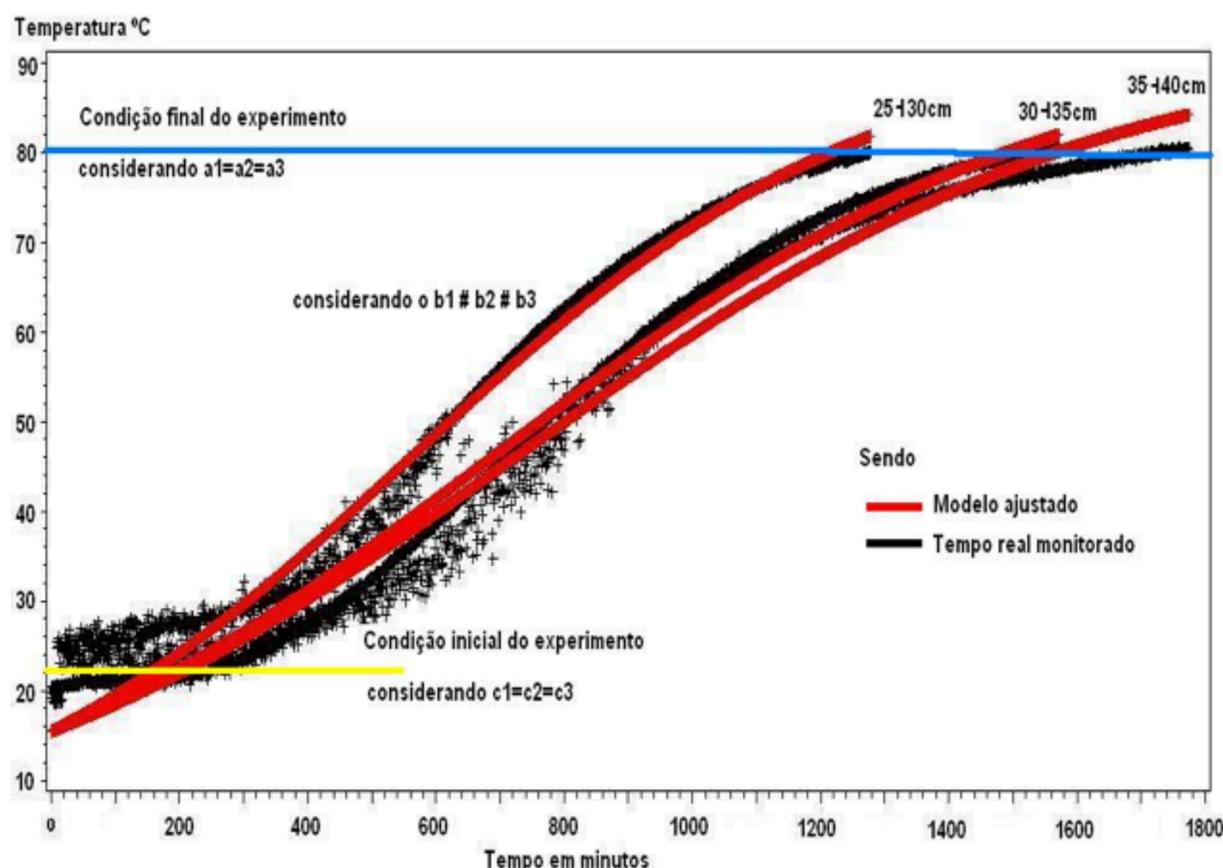


Figura 3

Modelo matemático ajustado para o tratamento térmico em água quente, em função do tempo real monitorado e o tempo estimado, sob temperatura e profundidade de 50mm do rolo-resto.



O modelo final considera-se que $a_1 = a_2 = a_3$ e $c_1 = c_2 = c_3$. Podemos concluir que para os valores de c_1 , c_2 , c_3 foram considerados iguais devido às condições iniciais de temperatura do experimento. Assim, tanto para a tora quanto para o meio eram iguais partindo do princípio que todos os termopares estavam na mesma temperatura que o meio condutor de calor. Na hipótese que a_1 , a_2 , a_3 serem considerados iguais, é porque em ambas as profundidades dos termopares acoplados nas toras por classe diamétrica quando atingissem 80°C era interrompida a coleta de dados (Tempo e Temperatura), portando considera-se que c_1 , c_2 , c_3 tende a atingir a mesma temperatura estabelecida do experimento.

Considerando o modelo matemático logístico da Equação (3) ajustado para o tratamento térmico com água quente, o erro avaliado entre o tempo real e o tempo calculado para que o rolo-resto atingisse 80°C foi de 2,80%, considerado aceitável. Entre o tempo real do tratamento térmico com água quente foi de 19 horas e 05 minutos, enquanto que tempo calculado foi de 19 horas e 38 minutos. Já para o tratamento térmico a vapor o tempo real monitorado foi de 20 horas e 23 minutos, enquanto que o valor calculado foi de 21 horas e 12 minutos, apresentando um erro aceitável de 3,85%.

Os ajustes dos modelos matemáticos de aquecimento efetuados nesse trabalho são iguais aos tempos dos tratamentos térmicos realizados por Coneglian (2009b), no qual mencionam que o aquecimento com água quente requer 15 horas e 25 minutos para o meio atingir 85°C, enquanto que Coneglian et al. (2013) relata que o aquecimento a vapor até atingir 85°C requer 19 horas e 02 minutos. A Tabela 2 demonstra o consumo energético e tempo de aquecimento para que o rolo-resto com 50mm atinja os 80°C, com o meio aquecedor a 85°C para as três classes diamétricas estudadas.

Tabela 2
Tempo de aquecimento para as classes diamétricas e gasto energético do sistema para que o rolo resto com 50mm atinja 80 °C.

Tratamento térmico	Classe diamétrica	Tempo de aquecimento	Consumo médio de energia
Vapor	35 - 40 cm	33 horas e 37 minutos (80 °C)	404,04 kWh
	30 - 35 cm	26 horas e 44 minutos (80 °C)	320,76 kWh
	25 - 30 cm	19 horas e 09 minutos (80 °C)	228,24 kWh
Água Quente	35 - 40 cm	29 horas e 35 minutos (80 °C)	354,96 kWh
	30 - 35 cm	26 horas e 11 minutos (80°C)	314,16 kWh
	25 - 30 cm	20 horas e 45 minutos (80 °C)	249,00 kWh

No entanto, esse modelo matemático proposto apresenta um menor consumo de energia de em ambos os tratamentos, proporcionando um menor tempo de permanência das toras no tanque dos tratamentos térmicos.

4. Conclusões

O modelo matemático logístico obtido para estimar o tempo necessário para que o aquecimento atinja 80°C das toras com diâmetro de 25 - 40 cm até uma profundidade de 50mm de raio do rolo-resto em temperatura do meio de 85°C para os ambos os tratamentos térmicos foi:

$$\theta = \frac{a}{1 + e^{-bT+c}}$$

O modelo matemático ajustado apresenta um comportamento exponencial logístico é recomendado para os tratamentos térmicos a vapor e água quente, promovendo um consumo ideal de energia e otimização do tempo de permanência das toras de *Eucalyptus grandis* no tanque de aquecimento.

5. Referências bibliográficas

Almeida, R. R.; Bortoletto Júnior, G.; Jankowsky, I. P. Produção de lâminas a partir da madeira de clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 65, p. 49-58, jun. 2004. Disponível em:

http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/17294/Scientia_Forestalis_n65_p49-58_2004.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Calonego W. F.; Severo, T.D.S. (2005). Efeito da vaporização de toras na redução dos defeitos associados a tensão de crescimento de *Eucalyptus grandis*. *Revista Ciência Florestal*, 15(4): 431-440, Disponível em: <http://www.redalyc.org/html/534/53415410/>

Coneglian A.; Severo E. T. D.; Bortoletto G.; Batista, W. R. (2013). Modelo Matemático Aplicado na Vaporização de Toras de *Eucalyptus grandis*. *Ciência da Madeira*.4:60-72. Disponível em:

<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/cienciadamadeira/article/view/4053>

Coneglian A.; Severo E. T. D.; Bortoletto G. (2009a). Avaliação do processo de laminação de toras de *Eucalyptus grandis* utilizando o tratamento térmico com vapor. *Revista Energia na Agricultura*. 26(2): 1-13. Disponível em: <http://energia.fca.unesp.br/index.php/energia/issue/view/76>

Coneglian A.; Severo E. T. D.; Calonego F. W.; Bortoletto G. (2009b). Estimativa do tempo de aquecimento de toras de *Eucalyptus grandis* em água quente. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal*, Fev;1 (13):26-35.

Disponível em: http://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/o5FJBG6myd5o6hi_2013-4-29-10-21-25.pdf

FAOSTAT – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION CORPORATE STATISTICAL DATABASE. 2014. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/F/FO/E>

Feihl O, Godin V. (1970). Setting veneer lathes with aid of instruments. Ottawa: Canadian Forest Service, s.1, 42p. (publication, 1206). Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19600604971>

Guimarães Júnior, J. B.; Mendes, L. M.; Mendes, R. F.; Mori, F. A. Painéis compensado de eucalipto: estudo de caso de espécie e procedências. *Cerne*, Lavras, v. 15, n. 1, p. 10-18, jan./mar. 2009. Disponível em:

http://www.sifloresta.ufv.br/bitstream/handle/123456789/15988/Cerne_v15_n1_p10-18_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores: **Relatório Ibá 2016**. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf

Iwakiri, Setsuo et al. Produção de painéis compensados estruturais com diferentes composições de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea*. *Rev. Árvore* [online]. 2012, vol.36, n.3, pp.569-576. ISSN 1806-9088. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622012000300019>. Disponível em:

<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v36n3/v36n3a19>

Kubler H. (1987). Growth stresses in trees and related wood properties. *Forest Products Abstracts*, Farnham Royal, 10(3):61-119.

Lenth C. A. and Kamke F. A. 2001. Moisture dependent softening behavior of wood. *Wood Fiber Sci* 33(3): 492-507. Disponível em:

<https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1635/1635>

Lutz J. F. (1974). Effect of moisture content and split of cut on quality of rotary – cut – veneer. USDA: Forest Service FPL research.note, Madison, (176):1-63. Disponível em:

<https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrn/fplrn176.pdf>

Quirino WF. & Vale AT. Retificação térmica de *Eucalyptus grandis*. *Floresta*, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná-FUPEF, Edição Especial; Set 2002. 60-66 p. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=310757&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22QUIRINO,%20W.%20F.%22&qFacets=autoria:%22QUIRINO,%20W.%20F.%22&sort=&paginacao=t&pa>

Sales C. G. (1986). Growth stresses: main results obtained on the study of guayana species and consequences for and use. In: Iufro world congress, 18, Ljubljana, Proceedings... Ljubljana: IUFRO, 1986, 5:234-248.

Steinhagen H. P.; Meyers G.E.; Kubler H. (1980) Heating times charts for frozen and nonfrozen veneer logs. *Forest Products Journal*, 30(4): 27-37.

Disponível em: https://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/5436/Heating_Time_ocr.pdf?sequence=1

1. Bacharel em Engenharia Florestal e Professor Dr. Universidade Estadual de Goiás, 75780-000 Ipameri-GO, Brasil. coneglian@ueg.br

2. Bacharel em Engenharia Florestal e Professor Dr. Universidade Estadual Paulista/FCA, Botucatu-SP, Brasil. severo@fca.unesp.br

3. Bacharel em Física e Professor. Dr. Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba-MG, Brasil. wrbatista@gmail.com

4. Bacharel em Biologia e Professor Dr. Universidade Estadual de Goiás, 75780-000 Ipameri-GO, Brasil. ismaelmpufg@gmail.com

[Índice]

[No caso de você encontrar quaisquer erros neste site, por favor envie e-mail para webmaster]