

MODELAGEM DO RENDIMENTO NO DESDOBRAMENTO DE TORAS DE EUCALIPTO CULTIVADO EM SISTEMA AGROFLORESTAL

Álvaro Nogueira de Souza¹, Antônio Donizette de Oliveira², José Roberto Soares Solforo²,
José Marcio de Mello², Luiz Marcelo Tavares de Carvalho²

(recebido: 18 de outubro de 2006; aceito: 22 de março de 2007)

RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo geral ajustar modelos para estimar o rendimento do processamento de toras em serraria, utilizando-se árvores plantadas em sistemas agroflorestais. Especificamente, pretendeu-se determinar o rendimento do desdobro de toras na serraria; ajustar modelos para estimar o volume de tábuas, o rendimento do processamento de toras na serraria e o tempo gasto para processar as toras, em função de variáveis dendrométricas, considerando dois tipos de produtos. A base de dados foi composta por 150 toras de clones de eucalipto divididas em 5 classes de diâmetro. Determinou-se o volume real de cada tora por meio de cubagem rigorosa, utilizando-se o método de Smalian. Após o desdobro das toras, as peças (tábuas) foram cubadas para determinar o volume de madeira serrada. O tempo gasto no desdobro e as dimensões das toras foram usados para ajustar modelos de rendimento em função do tempo e das características dendrométricas. As equações foram avaliadas com base no coeficiente de determinação, erro padrão da estimativa e distribuição gráfica dos resíduos. As equações para estimar o rendimento do desdobro de toras tiveram maior influência do volume da tora e do diâmetro de sua ponta mais grossa. As melhores equações para estimar o volume de tábuas foram as que tiveram como variáveis independentes o volume das toras, seu diâmetro na ponta mais grossa e seu comprimento. Quando se consideraram os dois produtos juntos, as melhores equações foram as que estimaram o rendimento em função do volume da tora, de seu diâmetro da ponta mais grossa, de seu diâmetro da ponta mais fina e do tipo de produto considerado. As equações para estimar o tempo gasto para serrar as toras e obter os produtos foram mais influenciadas pela classe diamétrica, no caso do produto 1 e pelo volume das toras, no caso do produto 2. As equações que estimaram o tempo gasto para serrar os dois produtos juntos tiveram performances muito semelhantes. O tempo gasto foi influenciado pelas variáveis dendrométricas e suas combinações.

Palavras-chave: Serraria, processamento da madeira, *Eucalyptus*.

MODELING OF LOG PROCESSING PRODUCTIVITY OF EUCALYPT PLANTED IN AGROFOREST SYSTEMS

ABSTRACT: This work fitted regression models in order to estimate the efficiency of wood processing in sawmills using trees from agro-forest systems. Specifically, it intended to determine the yield of processed boards volume, to adjust models for measuring the processing efficiency and the time needed for processing wood as a function of dendrometric variables, considering two different products. The database was composed of information derived from 150 logs of eucalypt clones encompassing 5 diameter classes. The real volume of each log was derived through detailed log scaling according to Smalian's method. After log processing, the boards were measured to determine the volume of sawn wood. The time needed for processing and the log dimensions were used to fit efficiency models as a function of time and of dendrometric characteristics. The equations were evaluated based on the coefficient of determination, standard error of estimation and graphic distribution of residues. The equations to estimate the processing efficiency were more influenced by log volume and by the diameter of the largest side. The best equations to estimate the volume of the boards were the ones that included log volume, diameter of the thickest side and log length as independent variables. When considering both products together, the best equations were the ones that included log volume, diameter of the thickest side, diameter of the thinnest side and the type of product as independent variables. The equations used to estimate the time needed to saw the logs were influenced by diameter class, in the case of product 1 and by the volume of the logs in the case of product 2. The equations used to estimate the time needed to process both products together showed similar performance. The time needed was influenced by the dendrometric variables and their combinations.

Key words: Sawmill, wood processing, sawn wood, *Eucalyptus*.

1 INTRODUÇÃO

A produtividade da serraria é influenciada por diversos fatores, destacando-se a característica da matéria-prima, a qualidade e o tipo de equipamento, o tamanho da planta e os tipos de produtos a serem produzidos.

A heterogeneidade de forma e dimensões da tora leva o operador a ter que tomar decisões pessoais durante o processamento da madeira. As causas de perdas estão relacionadas à fadiga, à desatenção e à falta de conhecimento, ou de habilidade, dos operadores (STEELE, 1984).

¹Professor do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília/UnB – Cx. P. 4357 – 70910-900 – Brasília, DF – ansouza@unb.br

²Professores do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – donizete@ufla.br; jsolforo@ufla.br; josemarcio@ufla.br; passarinho@ufla.br

O rendimento de uma serraria é determinado pela relação entre o volume de produto ao final da etapa de desdobro e o volume de madeira roliça que entrou no conjunto de serras. Normalmente, o produto é quantificado pela contagem do número de tábuas com dimensões conhecidas e calculado o volume final, o que é uma tarefa na qual se empregam tempo e mão-de-obra em demasia.

Uma alternativa para essa situação é a utilização de modelos para estimar o rendimento da serraria. O prévio conhecimento da quantidade e das características do produto, ao final do processo de desdobro e secagem da madeira, garantiria à empresa o atendimento das exigências do mercado e a negociação com a certeza do atendimento dos contratos de compra e venda de produtos.

A modelagem pode ser aplicada utilizando-se dados de fácil mensuração, como as características dendrométricas do material a ser beneficiado.

O desdobro de toras de eucalipto é cada vez mais comum e sua madeira é utilizada para vários fins. No caso de plantios convencionais, o diâmetro das toras, que é a variável dendrométrica de mais fácil mensuração, influencia o rendimento, dado um grau de afilamento entre as duas pontas da tora. Para árvores plantadas em sistemas agroflorestais, esta influência será mais acentuada, pelo fato das árvores crescerem em espaçamentos mais amplos e, com isso, ocorrer maior afilamento no sentido base-topo.

Os trabalhos realizados, tentando ajustar modelos para estimativa de rendimento de serrarias, levaram em consideração o volume da tora (BARCHET, 2002; SUDAM, 1981), o diâmetro (ADAMS & DUNMIRE, 1977; BARCHET, 2002; SCHROEDER et al., 1968; SCHROEDER & HANKS, 1967; YAUSSEY, 1983), a conicidade (BARCHET, 2002) e o comprimento da tora (LEITE, 1994). Todos esses trabalhos foram conduzidos para estimativas de rendimento de serrarias, utilizando-se árvores em plantios convencionais ou árvores nativas. Para o caso de árvores plantadas em espaçamentos abertos, como no caso dos sistemas agroflorestais, ainda não se conhece a performance da modelagem.

O uso de modelos para a estimativa do rendimento de serrarias poderá gerar informações importantes para a composição de modelos e a formação de sistemas para se conhecer o rendimento futuro de uma floresta em termos de volume de produto final, proporcionando estratégias mais ousadas e seguras, com vistas aos mercados de tais produtos.

O presente trabalho teve como objetivo geral ajustar modelos para estimar o rendimento do processamento de

toras em serraria, utilizando-se árvores plantadas em sistemas agroflorestais. Especificamente, pretendeu-se determinar o rendimento do desdobro de toras na serraria; ajustar modelos para estimar o volume de tábuas e o rendimento do processamento de toras na serraria em função de variáveis dendrométricas; ajustar modelos para estimar o tempo gasto para processar toras na serraria em função de variáveis dendrométricas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e caracterização da área de estudo

A área de estudo pertence à Companhia Mineira de Metais (CMM), Grupo Votorantin, localizada no município de Vazante, na região Noroeste do Estado de Minas Gerais. A latitude é 17°36'09" e a longitude é 46°42'02" Oeste de Greenwich. A altitude é de 550 m. O clima é do tipo Aw, tropical úmido de savana, com inverno seco e verão chuvoso, segundo a classificação de Köppen (ANTUNES, 1986). A temperatura média anual é de 24°C e a precipitação média anual é de 1.450 mm.

As unidades de estudo foram compostas por toras de um clone de híbridos naturais de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis*, plantado em consórcio com arroz, soja e pastagem no espaçamento 4 x 10 metros.

2.2 Caracterização da serraria

A serraria considerada no estudo tem a seguinte composição: esteira alimentadora de toras; serra circular dupla para retirada das costaneiras das toras; transporte longitudinal de rolos (leva o bloco até o conjunto multilâminas); serra circular múltipla; transporte longitudinal de rolos (transporta as tábuas até a mesa de rodízios); mesa de rodízios (transporta as costaneiras até a serra circular múltipla); serra circular múltipla (retira um bloco de costaneira); mesa de rodízios (conduz o bloco da costaneira até a resserra circular); resserra circular (retira tábuas do bloco de costaneiras); mesa de rodízios (transporta as tábuas até a mesa de rolos livres); mesa de rodízios (transporta as tábuas originadas das costaneiras até a destopadeira); mesa de rodízios (conduz os resíduos do conjunto de serras ao depósito de resíduos); mesa de rolos livres (encaminha os resíduos da serragem das costaneiras para o depósito de resíduos); destopadeira gabinete pneumática (retira a ponta das tábuas com pequenas rachaduras ou o excesso de produto para adequar às medidas exigidas); mesa de rodízios (conduz as tábuas para o local onde ficam depositadas até sua retirada para o armazenamento final); mesa de rolos livres

(conduz as tábuas do bloco principal até a destopadeira); destopadeira dupla (retira a ponta das tábuas com pequenas rachaduras ou o excesso de produto para adequar às medidas exigidas das tábuas que saem do processamento do bloco principal); esteiras que conduzem os resíduos até seu local de armazenamento.

2.3 Rendimento da serraria

Foram considerados dois produtos com as seguintes dimensões: produto 1 – tábuas de 10 cm de largura, 2,80 m de comprimento e 20 mm de espessura; produto 2 – tábuas de 14 cm de largura, 2,80 m de comprimento e 37mm de espessura.

O estudo do rendimento da serraria foi desenvolvido em dois momentos. No momento 1, as toras foram agrupadas em cinco classes diamétricas: classe 1 (15cm a 18 cm), classe 2 (18,1 cm a 21 cm), classe 3 (21,1 cm a 24 cm), classe 4 (24,1cm a 27cm) e classe 5 (27,1cm a 30cm) de acordo com as bitolas mínima e máxima da serraria. O diâmetro limitante foi o do extremo mais fino da seção. A serraria não suporta diâmetros superiores a 30 cm. No momento 2, ocorreu a organização das toras no pátio da serraria em “boxes” para cada classe diamétrica, respeitando-se, dentro de cada classe, uma amostra com 5 repetições de 3 toras cada, totalizando 15 toras por classe diamétrica. Como foram avaliados 2 produtos diferentes, o número de toras por classe diamétrica foi de 30 e o número total de toras foi de 150.

Calculou-se o volume de cada tora, em cada repetição, por meio de cubagem rigorosa, utilizando-se o método de Smalian, conforme a fórmula a seguir:

$$V_i = \left(\frac{g_i + g_{i+1}}{2} \right) \times L$$

em que:

V_i = volume da seção considerada;

g_i = área seccional da seção mais fina, com casca;

g_{i+1} = área seccional da seção mais grossa, com casca;

L = comprimento da seção.

Para obter o volume de madeira serrada, cubaram-se as peças (tábuas) de cada repetição, que saíram no final do conjunto de serras.

O rendimento do desdobro de toras na serraria foi determinado pela seguinte relação:

$$R = \frac{V_{serrado}}{V_{tora}} \times 100$$

em que:

R = rendimento do desdobro de toras (%);

$V_{serrado}$ = volume das tábuas (m³);

V_{tora} = volume da tora com casca (m³)

2.4 Modelagem do rendimento percentual do processamento de toras na serraria

As dimensões das toras e das tábuas foram utilizadas em modelos como o apresentado a seguir para estimativa do rendimento da serraria.

$$R = f(D, D^2, L, L^2, V_t)$$

em que:

R = rendimento do desdobro de toras estimado (%);

D = diâmetro na seção maior da tora (cm);

L = comprimento da tora (m);

V_t = volume da tora (m³).

2.5 Modelagem da produção de tábuas na serraria

Para a modelagem da produção de tábuas na serraria foram ajustados modelos como o que está apresentado a seguir:

$$V_{tb} = f(D, D^2, L_g, V_t, d, ep)$$

em que:

V_{tb} = volume de tábuas estimado (m³);

d = diâmetro na seção menor de tora (cm);

L_g = largura da tábua (cm);

ep = espessura da tábua (mm).

2.6 Modelagem do tempo gasto para processar as toras

Foram ajustados modelos para estimar o tempo gasto para processar as toras e obter os produtos, como o mostrado a seguir:

$$T = f(Cl, cc, dm)$$

em que:

T = tempo gasto para serrar as toras (minutos);

Cl = classe diamétrica da tora com base na seção mais fina (cm);

cc = centro de classe diamétrica das toras (cm).

dm = diâmetro médio da tora (cm).

Mediu-se com cronômetro digital o tempo gasto para o processamento de cada repetição de três toras. O tempo considerado foi a partir da entrada das toras na esteira alimentadora até a saída do produto final.

A variável dependente expressou o rendimento (R), a quantidade de produto ao final do desdobro (Vtb) e o tempo gasto no processamento (T). Foram testados vários modelos, variando-se as combinações das dimensões das toras, a classe diamétrica, o volume da tora e o tempo. Assim, foram testados modelos para o produto 1, para o produto 2 e para os produtos 1 e 2 simultaneamente.

O comprimento da tora, embora sendo igual para os dois produtos, foi considerado nos modelos combinado a outras variáveis. Após o ajuste dos modelos, as equações foram selecionadas, utilizando-se o maior valor de R^2 (coeficiente de determinação), menor valor de $syx\%$ (erro padrão residual percentual) e a melhor distribuição gráfica dos resíduos em porcentagem. A significância das variáveis independentes em cada modelo, de acordo com o Teste "t" de Students, também foi considerada.

Ao todo, foram testados 30 modelos para cada variável independente para cada produto, totalizando 270 modelos. Foram consideradas apenas as equações que apresentaram estatísticas satisfatórias e significância das variáveis independentes. O método de análise de regressão utilizado foi o dos mínimos quadrados ordinários.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Rendimento do desdobro de toras

O rendimento do desdobro de toras na serraria foi de 38,57% para o produto 1 e de 37,05% para o produto 2. Estes valores são compatíveis com aqueles encontrados para outras serrarias, em que pese o fato de cada equipamento ter características próprias que afetam o rendimento. Por exemplo, Carpinelli (2002) encontrou que o rendimento do desdobro de toras e a produtividade em madeira serrada de uma floresta de *Eucalyptus grandis* varia de 33% a 61%.

3.2 Modelagem do rendimento percentual do desdobro de toras na serraria

As equações que permitem obter as melhores estimativas do rendimento do desdobro de toras para os produtos 1 e 2 separadamente e para estes produtos em conjunto, em função das variáveis dendrométricas, estão apresentadas na Tabela 1.

Para o produto 1, em todos os casos, os valores das estatísticas R^2 e syx , foram muito próximos. As equações apresentaram um bom desempenho, sendo que quase todas as variáveis independentes foram altamente significativas.

Os valores de R^2 das equações ajustadas para o produto 1 foram maiores que os das equações ajustadas para o produto 2. Por outro lado, os valores de syx dos

modelos ajustados para o produto 2 foram menores que os dos modelos ajustados para o produto 1.

De maneira geral, a distribuição gráfica dos resíduos (Figuras 1 e 2) não apresentou tendência em nenhum dos modelos analisados. Segundo Scolforo (1997), a distribuição de resíduos deve ser o principal argumento na seleção de equações.

Quando se considerou o processamento dos produtos 1 e 2 conjuntamente, os resultados encontrados mostraram que é possível o uso de equações para rendimento, utilizando o produto como uma das variáveis independentes.

As equações de rendimento, considerando os dois produtos processados simultaneamente, proporcionaram boas estimativas e as estatísticas foram muito semelhantes. Na Figura 3, observa-se que os resíduos também tiveram comportamento muito semelhante entre as 6 equações apresentadas. Considerando a significância das variáveis independentes, todas as equações poderão ser usadas para a estimativa do rendimento para esse caso.

3.3 Modelagem da produção de tábuas

As melhores equações para estimar o volume de tábuas para o produto 1 estão apresentadas na Tabela 2, e os resíduos estão apresentados na Figura 4.

Embora o R^2 tenha sido baixo, o erro padrão da estimativa também foi baixo, mostrando que as equações representam bem o volume de tábuas, fato que pode ser comprovado pelo grau de significância das variáveis independentes. A equação 4 foi a que se mostrou mais eficiente, quando comparada com as demais, no conjunto de todos os fatores que explicam sua eficiência.

Os modelos para a estimativa da produção de tábuas para o produto 2 (Tabela 2) tiveram boas performances. As estatísticas obtidas para as equações ajustadas para estimar o volume de tábuas foram superiores às obtidas para estimar o rendimento do desdobro de toras (Tabela 1). Porém, a significância das variáveis independentes foi igual. O gráfico de distribuição dos resíduos mostrado na Figura 5 apresenta a equação 3 como a melhor.

As equações para a estimativa da produção de tábuas, considerando os produtos 1 e 2, processados simultaneamente, estão apresentadas na Tabela 2. A significância das variáveis independentes revelou que elas são apropriadas para serem utilizadas na estimativa do volume de tábuas, considerando os dois produtos simultaneamente. A Figura 6 apresenta os resíduos para as seis equações selecionadas. Nota-se que a equação 6 foi a que apresentou a melhor distribuição gráfica dos resíduos, sendo, assim, considerada a de melhor performance.

Tabela 1 – Equações para estimar o rendimento do desdobro de toras para os produtos 1 e 2, medidas de precisão e grau de significância dos coeficientes de regressão.

Table 1 – Equations used to estimate the efficiency of log processing for products 1 and 2, measures of precision and degree of significance of the regression coefficients.

Nº	Equação	R ² (%)	Syx (%)
<u>Produto 1</u>			
1	$R = -4,09772 + 6,28788 \left(\frac{1}{Vt}\right)^{**} - 0,00534397 \left(\frac{1}{Vt^3}\right)^*$	83,91	7,57
2	$R = 201,443 - 5,72091(D)^{**} - 3,94111(d)^{**} + 596,746(Vt)^{**}$	84,09	7,53
3	$R = -8,98537 + 50814,5 \left(\frac{1}{D^2}\right)^{**} - 438084 \left(\frac{1}{D^3}\right)^{**}$	84,59	7,41
4	$R = 212,713 - 10,3148(D)^{**} + 0,0506796(D^2L)^{**}$	84,80	7,36
5	$R = -56,493 + 13,1697 \left(\frac{1}{Vt}\right)^{**} - 0,33238 \left(\frac{1}{Vt^2}\right)^{**} + 5,42465 (Cl)^*$	85,05	7,30
<u>Produto 2</u>			
1	$R = 24,8125 + 0,324925 \left(\frac{1}{Vt^2}\right)^{**} - 0,01396 \left(\frac{1}{Vt^3}\right)^{**}$	55,17	6,05
2	$R = 25,8848 + 0,0000046775 \left(\frac{1}{dm^4}\right)^{**} - 0,000523665 \left(\frac{1}{Vt^4}\right)^{**}$	55,46	6,03
3	$R = 27,649 + 135674 \left(\frac{1}{dm^3}\right)^{**}$	52,54	6,23
4	$R = 58,2545 + 0,0243132 (Cl^4)^{**} - 0,0000846982 (dm^4)^{**} + 17876 (Vt^4)^{**}$	58,83	5,80
5	$R = 28,778 + 0,0305982 \left(\frac{1}{Vt^3}\right)^{**} - 0,0016104 \left(\frac{1}{Vt^4}\right)^{**}$	56,71	5,95
<u>Produtos 1 e 2 conjuntamente</u>			
1	$R = 185,12 - 5,26847 (D)^{**} - 3,23519 (d)^{**} - 6,82712 (pr)^{**} + 563,389 (Vt)^{**}$	71,65	8,02
2	$R = 370,363 - 31,7179 (D)^{**} + 1,02827 (D^2)^{**} - 0,0115721 (D^3)^{**}$	68,03	8,51
3	$R = 185,12 - 5,26847 (D)^{**} - 3,23519 (d)^{**} - 6,82712 (pr)^{**} + 563,389 (Vt)^{**}$	71,65	8,02
4	$R = 115,853 - 0,0645695(dm^2L)^{**} + 0,827406(Cl^2)^{**} - 2,35966(pr^2)^{**} + 1562,23(Vt^2)^{**}$	72,41	7,91
5	$R = 0,538228 + 57578,6 \left(\frac{1}{dm^2L}\right)^{**} - 11,1348 \left(\frac{1}{Cl^2}\right)^{**} + 7,9308 \left(\frac{1}{pr^2}\right)^{**}$	72,25	7,93
6	$R = 21,7311 + 17035,4 \left(\frac{1}{D^2}\right)^{**} - 6,26326(pr)^{**}$	72,61	7,88

* Grau de significância maior que 95%; ** Grau de significância maior que 99%;

R = rendimento do desdobro de toras estimado (%); D = diâmetro na seção maior da tora (cm); d = diâmetro na seção menor da tora (cm); L = comprimento da tora (m); Vt = volume da tora (m³); Cl = centro de classe diamétrica da tora (cm); dm = diâmetro médio da tora (cm); pr = espessura do produto (mm).

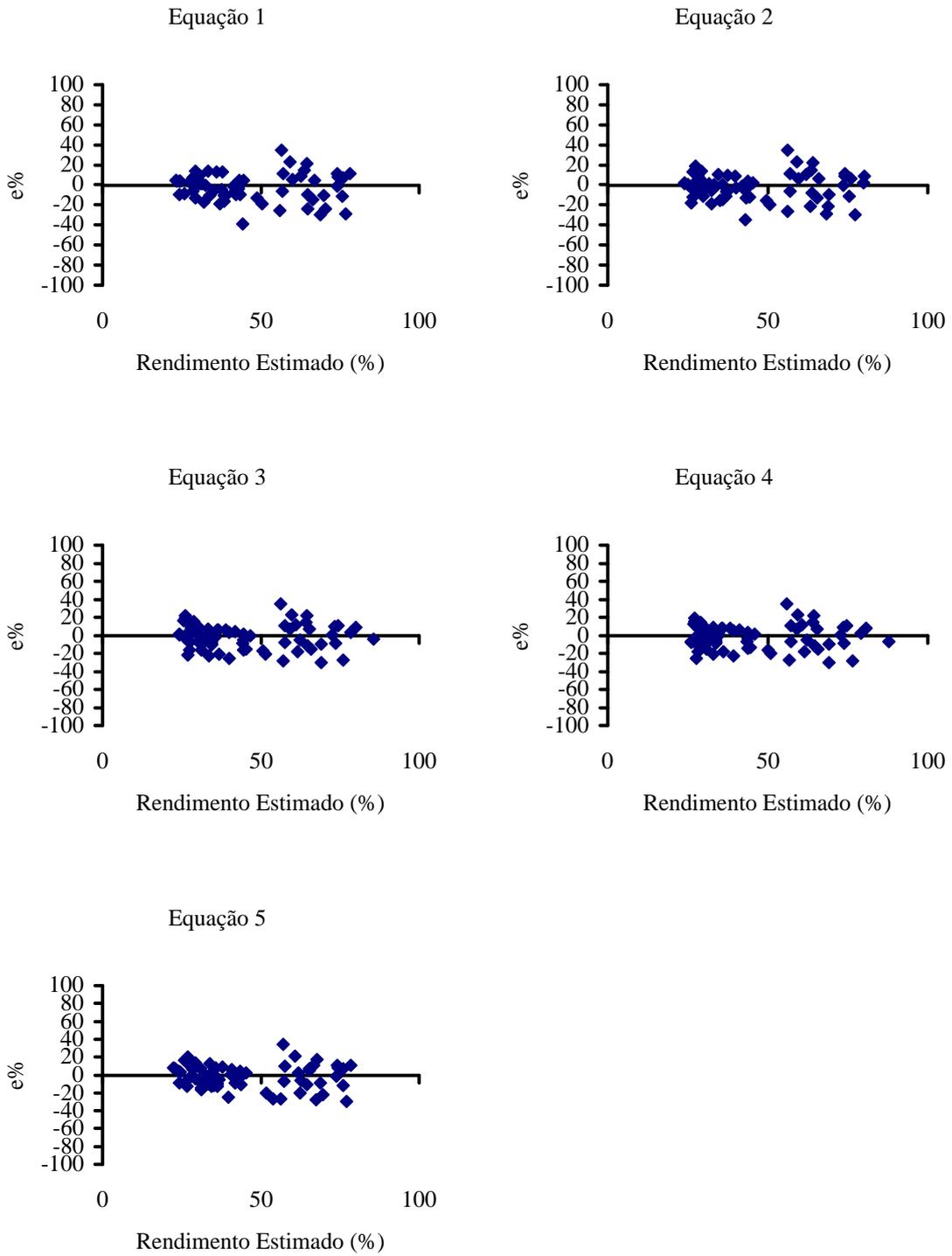


Figura 1 – Representação gráfica dos resíduos em função do rendimento do desdobro de toras estimado para o produto 1.

Figure 1 – Graphic representation of errors as a function of log processing efficiency estimated for product 1.

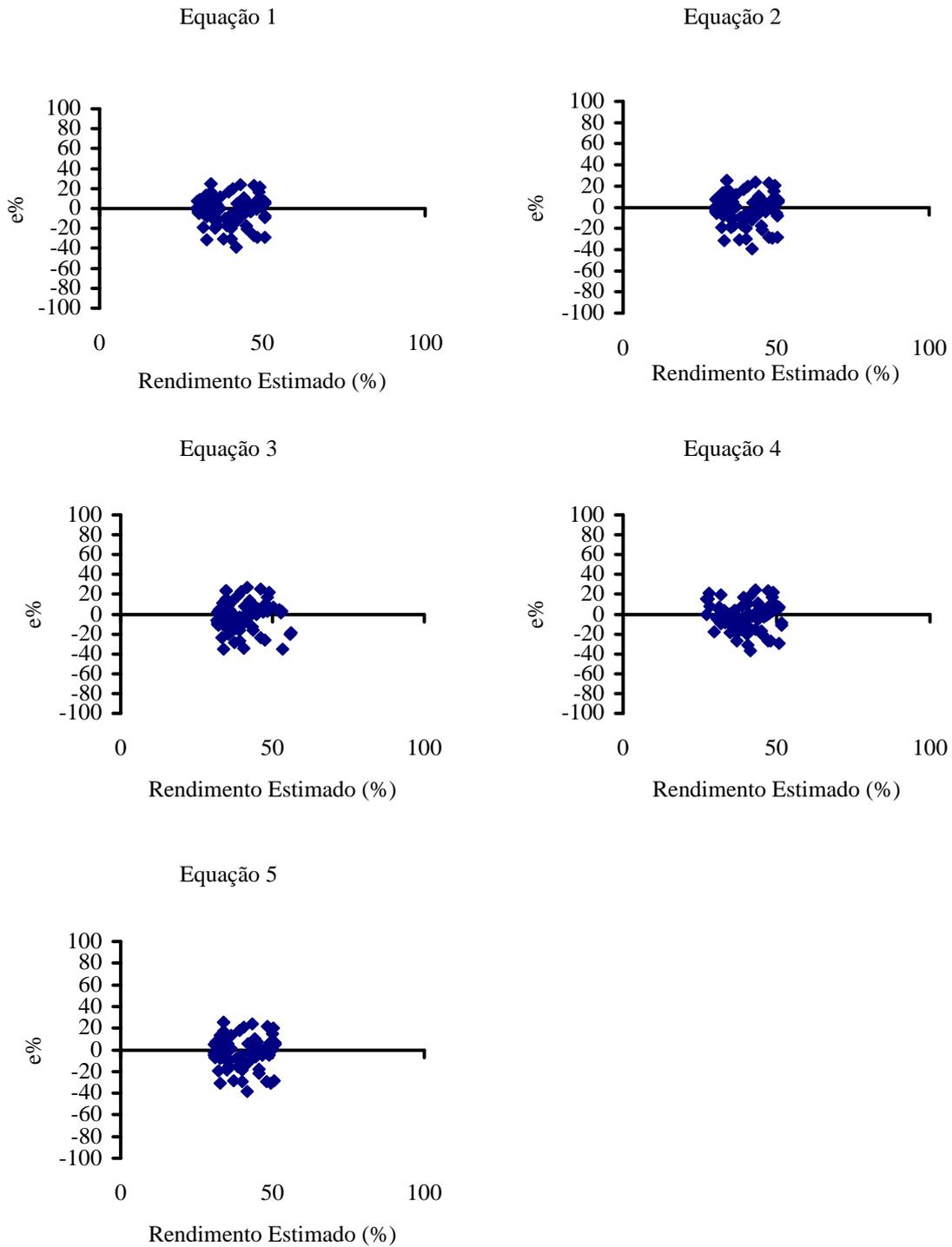


Figura 2 – Representação gráfica dos resíduos em função do rendimento do desdobro de toras estimado para o produto 2.

Figure 2 – Graphic representation of errors as a function of log processing efficiency estimated for product 2.

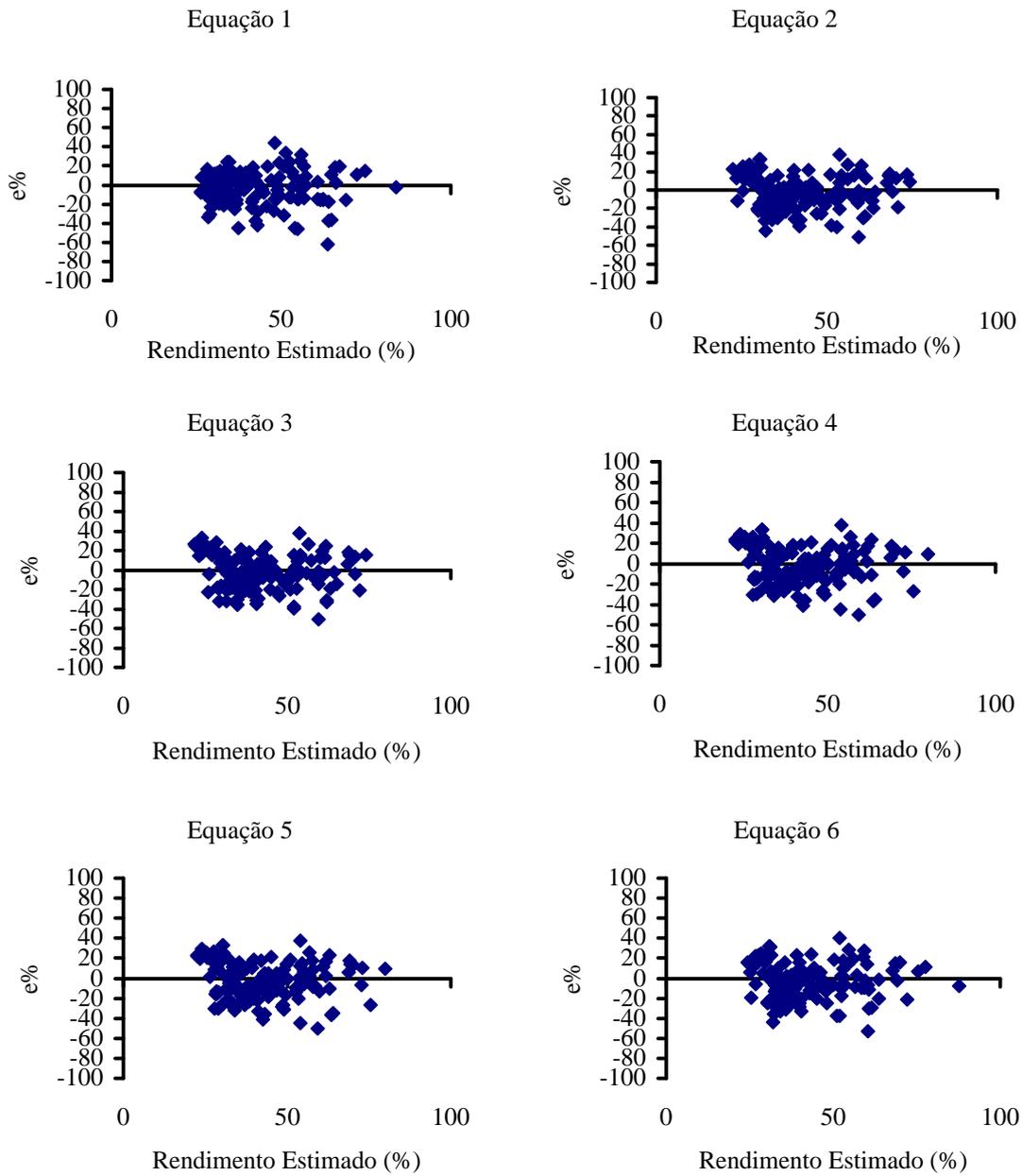


Figura 3 – Representação gráfica dos resíduos em função do rendimento do desdobro de toras estimado para os produtos 1 e 2 processados conjuntamente.

Figure 3 – Graphic representation of errors as a function of log processing efficiency estimated for products 1 and 2.

Tabela 2 – Equações para estimar o volume de tábuas para os produtos 1 e 2, medidas de precisão e significância das variáveis independentes.

Table 2 – Equations used to estimate the volume of boards for products 1 and 2, measures of precision and significance of the independent variables.

Nº	Equação	R ² (%)	Syx (%)
Produto 1			
1	$V_{tb} = 0,0393327 + 0,00842512(CI)^{**} - 0,00110873(CI^2)^{**}$	16,45	12,94
2	$V_{tb} = 0,0501688 + 0,00550899(CI)^{**} - 0,00124996(rep)^* + 0,00198485(t)^* - 0,109851(Vt)^{**}$	21,99	12,50
3	$V_{tb} = -0,115918 + 1,84818 \left(\frac{1}{CI}\right)^* - 6,5366 \left(\frac{1}{CI^2}\right)^* + 7,80286 \left(\frac{1}{CI^3}\right)^* - 2,95317 \left(\frac{1}{CI^5}\right)^*$	30,35	11,81
4	$V_{tb} = 0,0359481 + 0,373811 \left(\frac{1}{CI^2 Vt}\right)^{**} - 2,07146 \left(\frac{1}{CI^3 Vt}\right)^{**} + 3,6608 \left(\frac{1}{CI^4 Vt}\right)^{**} - 1,96253 \left(\frac{1}{CI^5 Vt}\right)^{**}$	35,95	11,33
Produto 2			
1	$V_{tb} = -6,24694 + 2,27334 (CI^{(1/2)})^{**} - 21,3954 (CI^{(1/4)})^{**} + 25,4064 (CI^{(1/6)})^{**}$	70,86	13,37
2	$V_{tb} = 0,0399344 + 0,00292235(CI^4)(L)(ep)(Lg)^{**}$	70,91	13,36
3	$V_{tb} = 0,0571843 + 0,124042 (Vt)^{**} - 0,73976 \left(\frac{1}{CI^2}\right)^{**} + 1,81444 \left(\frac{1}{CI^3}\right)^{**} - 1,10366 \left(\frac{1}{CI^4}\right)^{**}$	69,50	13,68
4	$V_{tb} = 0,0282462 + 0,00670516(CI)^{**}$	64,60	14,74
5	$V_{tb} = -0,434554 - 3,76975 \left(\frac{1}{CI}\right)^{**} + 12,9829 \left(\frac{1}{CI^2}\right)^{**} - 18,4557 \left(\frac{1}{CI^3}\right)^{**} + 8,84546 \left(\frac{1}{CI^4}\right)^{**}$	72,04	13,10
Produtos 1 e 2 conjuntamente			
1	$V_{tb} = 0,0547749 - 0,0043950(cc^2)(L)(ep)(Lg)^{**} + 0,166013(CI^2)(L)(Lg)(ep)^{**}$	48,21	14,39
2	$V_{tb} = 0,0736816 - 0,661699 \left(\frac{1}{CI^3}\right)^{**} - 0,982726 \left(\frac{1}{CI^4}\right)^{**}$	33,10	16,36
3	$V_{tb} = 0,0492239 + 0,0697975(CI^2)(L)(Lg)(ep)^{**} - 0,2193(pr^2)(L)(Lg)(ep)^{**}$	49,12	14,27
4	$V_{tb} = 0,0494382 + 0,0133369(CI^3)(L)(Lg)(ep)^{**} - 0,0902427(pr^3)(L)(Lg)(ep)^{**}$	49,23	14,25
5	$V_{tb} = 0,0681892 + 0,098572(CI^2)(L)(Lg)(ep)^{**} - 0,0000259793(cc^2)^{**} - 0,00486018(pr^2)^{**} - 0,0000360553 \left(\frac{1}{Vt^2}\right)^{**}$	50,74	14,04
6	$V_{tb} = 0,0511848 + 5,15017(CI^2)(L^2)(Lg^2)(ep^2)^{**} - 18,3548(pr^2)(L^2)(Lg^2)(ep^2)^{**}$	49,73	14,18

* Grau de significância maior que 95%; ** Grau de significância maior que 99%;

D = diâmetro na seção maior da tora (cm); d = diâmetro na seção menor da tora (cm); L = comprimento da tora (m); Vt = volume da tora (m³); CI = classe diamétrica da tora com base na seção mais fina (cm); dm = diâmetro médio da tora (cm); ep = espessura do produto (mm); Lg = largura da tora (cm); Vtb = volume de tábuas (m³); pr = produto; cc = centro de classe da tora (cm); rep = volume médio da repetição (m³).

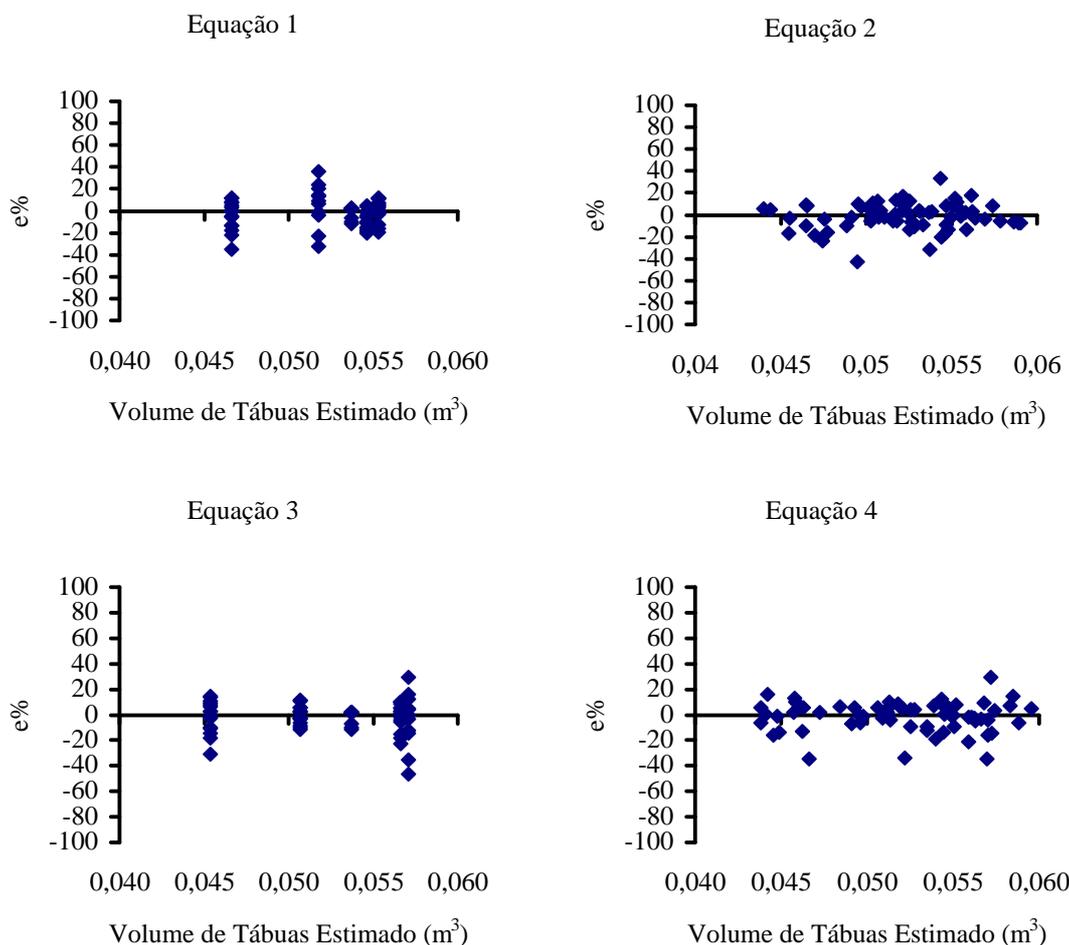


Figura 4 – Representação gráfica dos resíduos em função do volume de tábuas estimado para o produto 1.

Figure 4 – Graphic representation of errors as a function of board volume estimated for product 1.

3.4 Modelagem do tempo gasto para processar as toras

As equações ajustadas para estimar o tempo gasto para processar as toras, visando obter os produtos 1 e 2, estão apresentadas na Tabela 3.

Em relação aos modelos ajustados para o produto 1, todas as variáveis independentes são altamente significativas, com mais de 99% de probabilidade. Pela distribuição gráfica dos resíduos, apresentada na Figura 7, é possível apontar a equação 4 como a de melhor ajuste, embora haja uma leve tendência em superestimar o tempo.

Para o produto 2, o grau de significância e as estatísticas apresentadas na Tabela 3 mostram bons ajustes para o tempo. As performances das equações foram muito semelhantes, como pode ser observado nos gráficos dos resíduos apresentados na Figura 8.

A seleção pela distribuição gráfica dos resíduos mostrou que as equações são muito parecidas, podendo-se eleger qualquer uma delas para estimar o tempo, com uma pequena desvantagem para a equação 4, devido à significância maior que 95% das variáveis independentes contra aquelas maiores que 99% das outras equações.

A modelagem do tempo gasto para processar as toras para a obtenção dos produtos 1 e 2, simultaneamente, mostrou-se mais eficiente do que a modelagem para o tempo gasto para serrar cada produto separadamente. Tal fato pode ser explicado pelo número de observações, no caso dos dois produtos juntos (50 observações) contra as observações dos produtos isolados (25 observações).

A boa performance das equações pode ser comprovada pela análise da Figura 9, que mostra a distribuição dos resíduos.

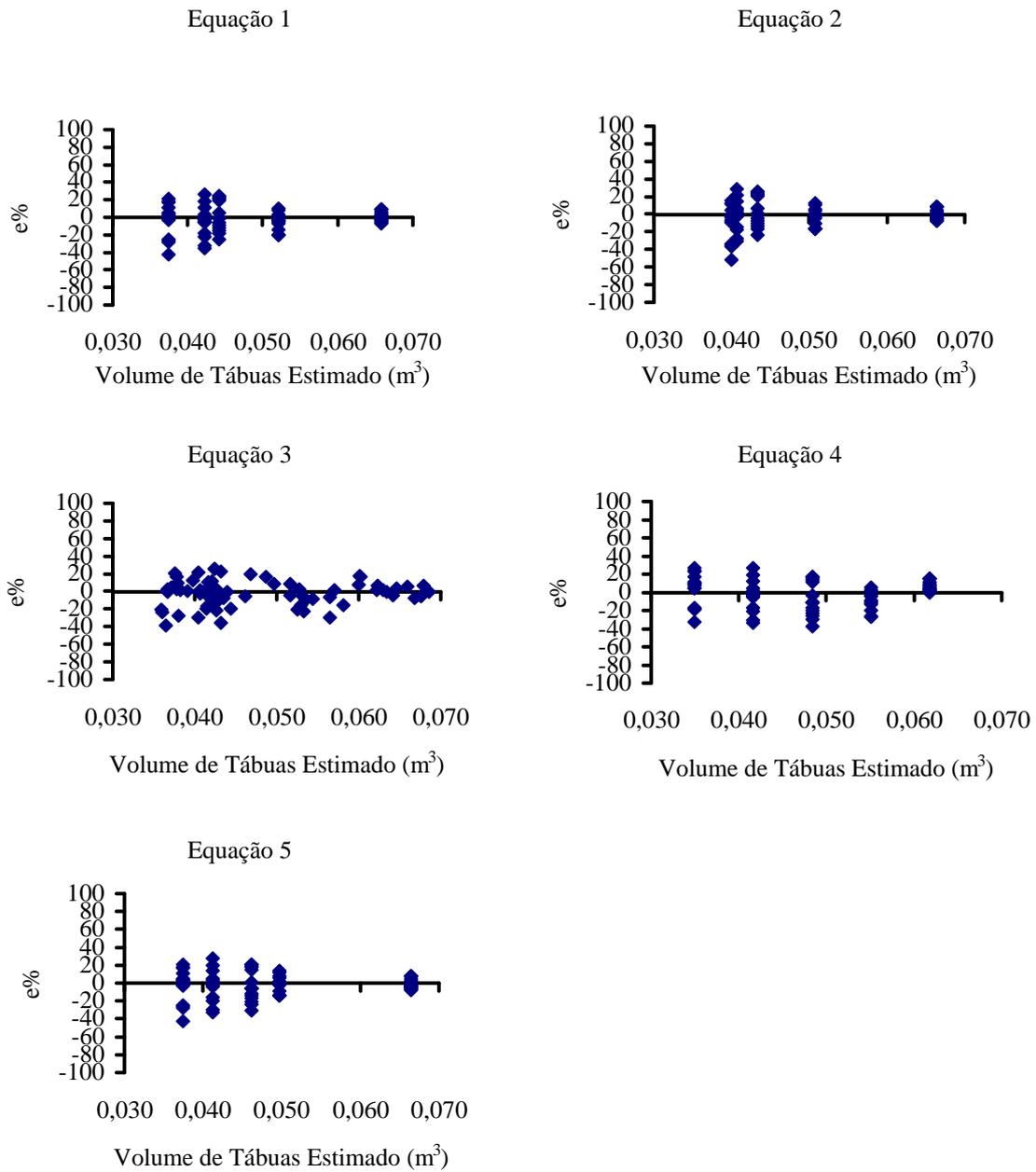


Figura 5 – Representação gráfica dos resíduos em função do volume de tábuas estimado para o produto 2.

Figure 5 – Graphic representation of errors as a function of board volume estimated for product 2.

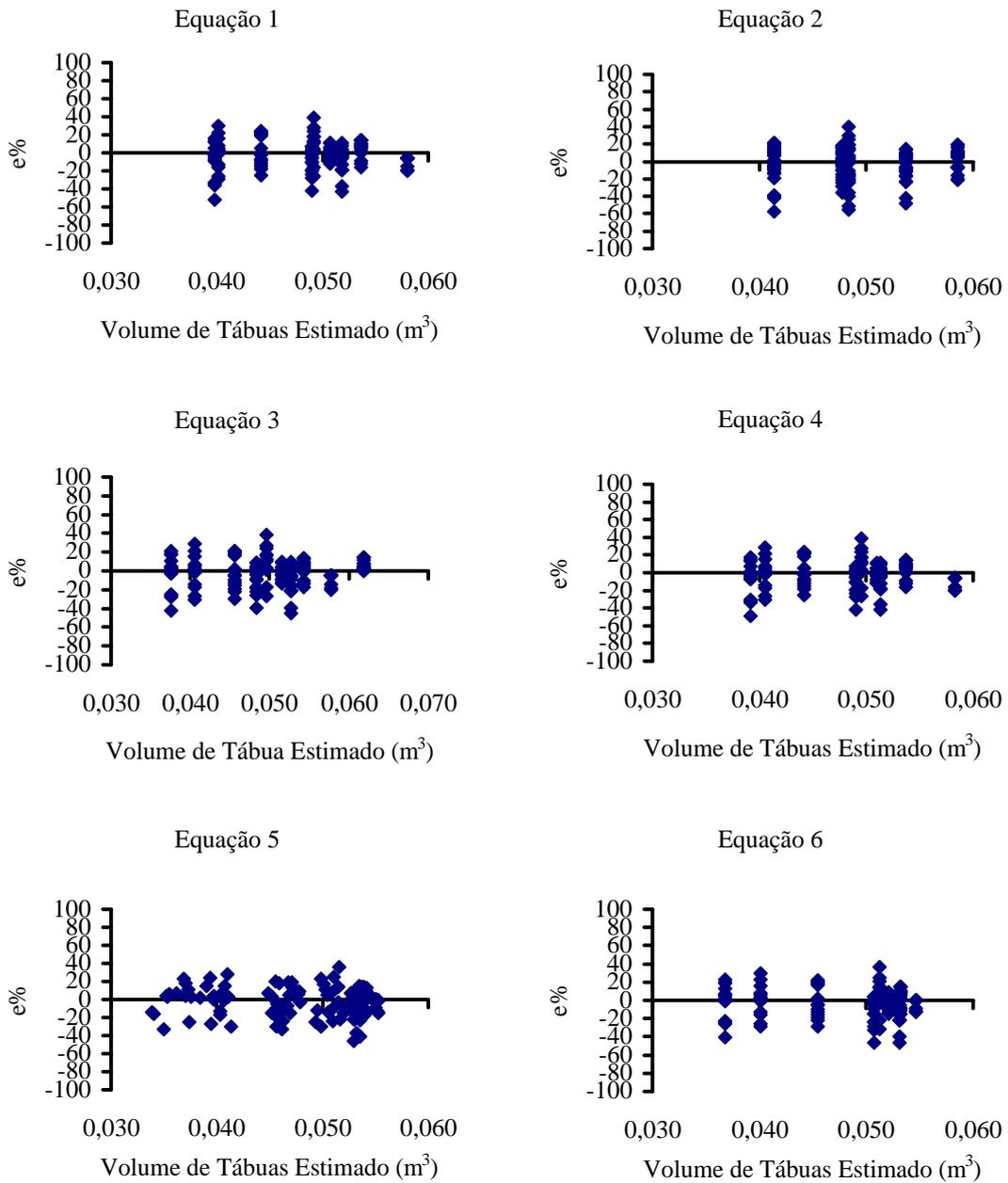


Figura 6 – Representação gráfica dos resíduos em função do volume de tábuas estimado para os produtos 1 e 2 conjuntamente.

Figure 6 – Graphic representation of errors as a function of board volume estimated for products 1 and 2.

Tabela 3 – Equações para estimar o tempo (minutos) gasto no processamento das toras visando obter os produtos 1 e 2, medidas de precisão e significância das variáveis independentes.

Table 3 – Equations used to estimate the time (minutes) needed for log processing in order to obtain products 1 and 2, measures of precision and significance of the independent variables.

Nº	Equação	R ² (%)	Syx (%)
Produto 1			
1	$T = 2,68091 + 0,00388077(CI^4)^{**}$	70,94	17,02
2	$T = 2,71648 + 0,000128817(CI^4)(dm)^{**}$	70,64	17,10
3	$T = 2,62772 + 1435,84(Vt^4)^{**}$	59,14	20,18
4	$T = 2,76213 + 0,000766813(CI^5)^{**}$	71,04	13,57
Produto 2			
1	$T = 1,04323 + 17,5939(Vt)^{**}$	78,96	12,30
2	$T = 2,02909 + 1090,9(Vt^3)^{**} - 3878,79(Vt^4)^{**}$	80,97	11,70
3	$T = -1,1211 + 0,186362(dm)^{**}$	77,63	12,68
4	$T = 1406,2 - 14,8267(dm)^* - 48713,9\left(\frac{1}{dm}\right)^* + 737909\left(\frac{1}{dm^2}\right)^* - 4128770\left(\frac{1}{dm^3}\right)^*$	82,69	11,16
5	$T = 5,5486 - 0,0602907\left(\frac{1}{Vt^2}\right)^{**} + 0,00316581\left(\frac{1}{Vt^3}\right)^{**}$	77,03	13,40
6	$T = 2,23198 + 7588,29(Vt^4)^{**} - 30579,5(Vt^5)^{**}$	82,92	11,08
Produtos 1 e 2 conjuntamente			
1	$T = -3,43809 + 0,271335(dm)^{**} + 1,76446\left(\frac{1}{dm^2Vt^2}\right)^{**}$	74,60	14,43
2	$T = 2,16082 + 0,00000325452(dm^4)^{**}$	74,65	14,41
3	$T = -6308,75 + 74,8176(cc)^{**} + 198214\left(\frac{1}{cc}\right)^{**} - 2744060\left(\frac{1}{cc^2}\right)^{**} + 14118800\left(\frac{1}{cc^3}\right)^{**}$	74,71	14,40
4	$T = 7,38742 - 0,395836(cc)^{**} + 1,59201(CI)^{**}$	74,78	14,35
5	$T = -8,0928 + 0,384924(dm)^{**} + 1197,97\left(\frac{1}{dm^2}\right)^{**}$	74,75	14,39
6	$T = 2,40054 + 5827,54(Vt^4)^{**} - 21681,6(Vt^5)^{**}$	75,08	14,29

* Grau de significância maior que 95%; ** Grau de significância maior que 99%;

T = tempo estimado para serrar os produtos (min); Vt = volume da tora (m³); CI = classe diamétrica da tora com base na seção mais fina (cm); dm = diâmetro médio da tora (cm); cc = centro de classe da tora (cm).

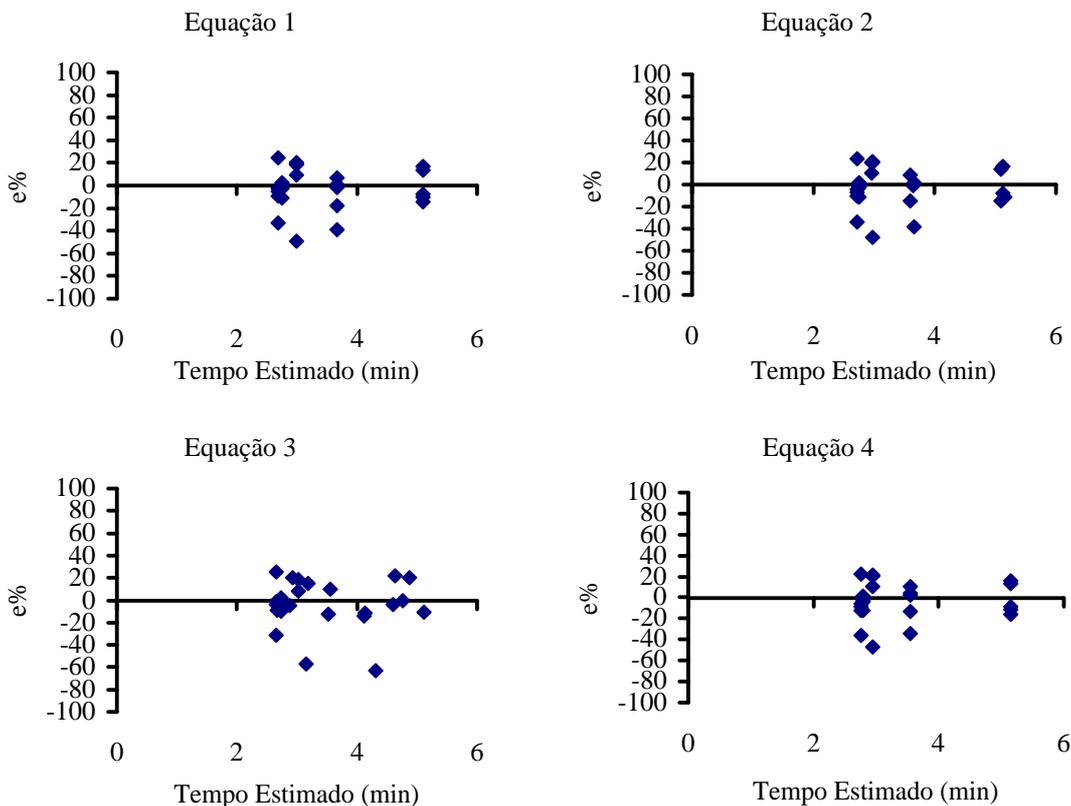


Figura 7 – Representação gráfica dos resíduos em função do tempo estimado para processar as toras, visando obter o produto 1.
Figure 7 – Graphic representation of errors as a function of the estimated time needed for log processing in order to obtain product 1.

4 CONCLUSÕES

Os resultados alcançados permitiram chegar às seguintes conclusões:

O rendimento da serraria usada para o desdobro das toras é compatível com o rendimento encontrado em outras serrarias e está dentro de valores normais.

As equações para estimar o rendimento do desdobro de toras para o produto 1 tiveram maior influência do volume da tora e do diâmetro de sua ponta mais grossa.

As melhores equações para o produto 2, foram as que estimaram o volume de tábuas em função do volume das toras, do diâmetro sua ponta mais grossa e de seu comprimento.

Quando se consideraram os dois produtos juntos, as melhores equações foram as que estimaram o rendimento em função do volume da tora, de seu diâmetro da ponta mais grossa, de seu diâmetro da ponta mais fina e do tipo de produto considerado.

As equações para estimar o tempo gasto para serrar as toras e obter os produtos foram mais influenciadas pela classe diamétrica, no caso do produto 1 e pelo volume das toras, no caso do produto 2.

As equações que estimaram o tempo gasto para serrar os dois produtos juntos tiveram performances muito semelhantes. O tempo gasto foi influenciado pelas variáveis dendrométricas e suas combinações.

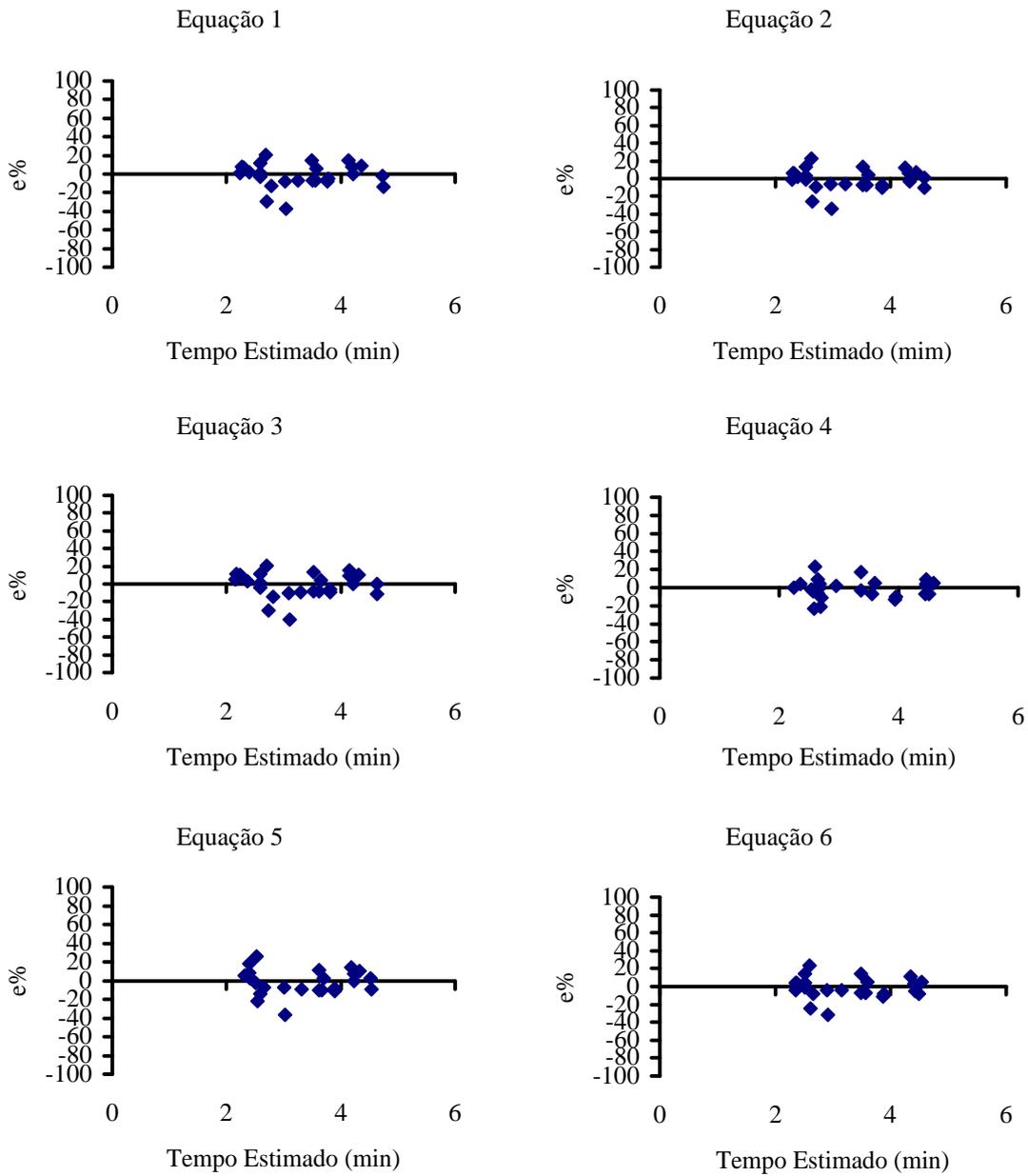


Figura 8 – Representação gráfica dos resíduos em função do tempo estimado para processar as toras, visando obter o produto 2.

Figure 8 – Graphic representation of errors as a function of the estimated time needed for log processing in order to obtain product 2.

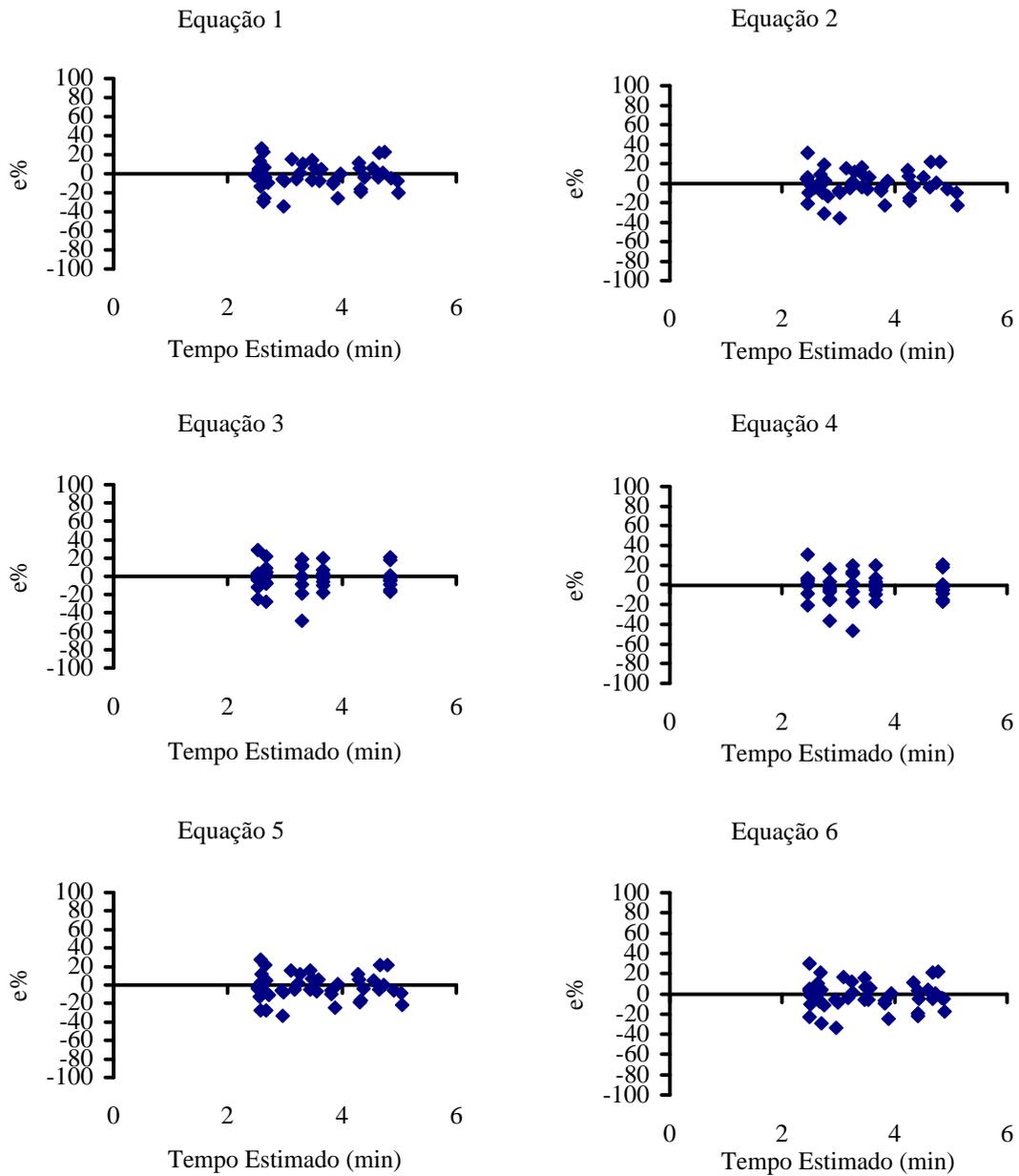


Figura 9 – Representação gráfica dos resíduos em função do tempo estimado para processar as toras, visando obter os produtos 1 e 2 conjuntamente.

Figure 9 – Graphic representation of errors as a function of the estimated time needed for log processing in order to obtain products 1 and 2.

5 AGRADECIMENTOS

À Companhia Mineira de Metais – Unidade Agroflorestal, nas pessoas dos Engenheiros Florestais Luciano Lage Magalhães e Vicente de Paula Silveira, pelo apoio à pesquisa durante a fase de coleta de dados na área da empresa. À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, E. L.; DUNMIRE, D. E. **SOLVE II: a technique to improve efficiency and solve problems in hardwood sawmills.** Washington, DC: USDA Forest Service Res. Pap., 1977. 19 p.
- ANTUNES, F. Z. Caracterização climática do Estado de Minas Gerais: climatologia agrícola. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 138, p. 9-13, jun. 1986.
- BARCHET, V. G. **Potencialidades de espécies de *Eucalyptus* para produção de madeira serrada.** 2002. 166 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.
- CARPINELLI, S. M. **Rendimento no desdobro e produtividade em madeira serrada de uma floresta de *Eucalyptus grandis*.** 2002. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.
- LEITE, H. G. **Conversão de troncos em multiprodutos da madeira, utilizando programação dinâmica.** 1994. 230 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.
- SCHROEDER, J. G.; CAMPBELL, R. A.; RODENBACH, R. C. **Southern pine log grades for yard and structural lumber.** Washington, DC: USDA Forest Service Res. Pap., 1968. 9 p.
- SCHROEDER, J. G.; HANKS, L. F. **Lumber grade yields for factory grade northern red oak sawlogs.** Washington, DC: USDA Forest Service Res. Pap., 1967. 7 p.
- SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal técnicas de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos da madeira.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 292 p.
- STEELE, P. H. **Factors determining lumber recovery in sawmilling.** Madison: United States Department of Agriculture, 1984. 8 p. (Genetics technical report, FPL-39).
- SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA. **Rendimento em serraria de trinta espécies de madeiras Amazônicas.** Belém, 1981. 186 p.
- YOUSSEY, D. A. **Multivariate regression model for predicting lumber grade volumes of northern red oak sawlogs.** Washington, DC: USDA Forest Service, 1983. 30 p.