

Análise energética de dois sistemas mecanizados na colheita do eucalipto

Energy analysis of *Eucalyptus* harvesting operations in two mechanized systems¹Ezer Dias de Oliveira Júnior e ²Fernando Seixas**Resumo**

A colheita mecanizada de madeira é uma atividade com altos investimentos em máquinas, consumo de combustível e de lubrificante, representando dispêndio de energia. No caso da colheita mecanizada de eucalipto deve-se ponderar além da entrada de energia direta do combustível e do lubrificante, também a energia biológica do trabalho humano do operador e a energia indireta agregada pela utilização de máquinas e implementos. A mecanização das operações tem proporcionado aumento da capacidade operacional, no entanto, poucos trabalhos têm quantificado o dispêndio energético nas diversas atividades florestais quanto à utilização de máquinas. A caracterização desse potencial técnico para a produção da madeira, bem como a forma de utilização de energia ao longo da cadeia produtiva é de grande importância, pois existe grande dependência dos insumos proveniente da matriz fóssil. Na análise energética é contemplado o consumo de energia das operações florestais, sendo o enfoque principal a energia investida na atividade de colheita de um plantio florestal de eucalipto através de dois sistemas mecanizados, denominados de "toras curtas" e de "toras longas". Nesta análise foram simuladas as entradas de energia, classificadas e quantificadas conforme a fonte, considerando-se as características ponderais das máquinas e consumo de diesel em cada operação. Os cálculos de conversão foram realizados pelos métodos de equações e matrizes. Foi analisada também a atividade de transporte rodoviário com o objetivo de quantificar a relação de entradas totais de energia entre as operações. Pela análise energética do sistema quantificou-se o dispêndio de 51,54MJ.m⁻³ pelo transporte, 13,28MJ.m⁻³ pelo carregamento e na colheita, 37,77MJ.m⁻³ no sistema de toras curtas e 45,40MJ.m⁻³ no sistema de toras longas. A atividade de transporte representou em média 50% do dispêndio energético total. No sistema de toras longas, o dispêndio energético foi cerca de 20% maior quando comparado ao de toras curtas, utilizando-se o método matricial.

Palavras-chave: Análise energética, Colheita e transporte, *Eucalyptus*, Extração de madeira

Abstract

Harvesting is an activity with high investments in machines, lubricant and fuel consumption. The total energy required to operate forestry machines includes not only direct energy of the fuel and the lubricant, but also indirect energy such as associated with manual labor and manufacturing the equipment. The mechanization of the harvesting process has increased the operational capacity however few studies have focused on the energy consumption in the diverse forest activities regarding machine and inputs utilization in Brazil. This study quantifies the energy consumption in harvesting operations and forest transportation, evaluating in details, two harvesting systems: "cut to length" and "tree length". In this analysis all energy sources involved in the process were simulated, classified and quantified, considering machine productivity and diesel consumption in each operation. Making use of matrix method, the energy sources were classified as direct or indirect flow. The road transportation were also analyzed with the objective of quantifying the relation between the total inputs of harvesting and the existing energy spent in the transportation of the eucalypts wood after a seven year cycle. A systematic approach to forestry energy analysis requires all energy inputs of any significance to be included and accurately evaluated. The system energy analysis resulted 51.54MJ.m⁻³ for the transport, 13.28MJ.m⁻³ for the loading and for the harvesting 37.77MJ.m⁻³ and 45.40MJ.m⁻³, respectively in the "cut to length" and "tree length" system. Considering the performance and capacity of the machines in each module, the "tree length" system demanded 20% more energy than the "cut to length" system. Transportation accounted for 50% of the total energy consumption with used matrix method.

Keywords: Energy analysis, Harvesting, *Eucalyptus*, Primary transport

¹Doutor em Recursos Florestais pela Esalq/USP e professor na FAIT/FAEF - Rua das Flores, 740 - Garça, SP - 17400-000 - E-mail: ezer@faef.br

²Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP - Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP - 13418-900 - E-mail: fseixas@esalq.usp.br

INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se no cenário mundial pela importância da biomassa florestal e suas potencialidades com uma das mais altas taxas de produtividade na silvicultura, atingindo entre 40 e 50 metros cúbicos (m^3) de madeira por hectare ao ano, mais de 10 vezes superior à observada em países de clima temperado (STAPE, 2003).

Atualmente, os plantios de florestas comerciais no Brasil cobrem uma área de 4,8 milhões de hectares. No Estado de São Paulo são 770 mil hectares de plantios (3,1% da área). Desse montante, o eucalipto responde por 79,4%, o pinus com 20,6% e outras madeiras com 2% (KRONKA *et al.*, 2003).

De acordo com Serra *et al.* (1979), a mecanização das operações acentuou o uso da energia fóssil, em formas progressivamente sofisticadas, como consequência do planejamento e utilização de máquinas, fertilizantes e pesticidas, propiciando aumentos consideráveis na produtividade com o passar do tempo. A quantidade de energia usada nas operações depende de vários fatores, não só da energia proveniente do combustível, mas também daquela agregada na fabricação e distribuição das máquinas, do óleo lubrificante e hidráulico, do trabalho humano entre outros (BRIDGES e SMITH, 1979; FLUCK, 1985).

De acordo com Monteith (1980), o maior volume de madeira requer investimento proporcional de energia para a atividade de colheita utilizando-se sistemas mecanizados mais complexos, mas sem comprometer o balanço quanto às saídas e entradas energéticas. O balanço de energia para a atividade de colheita está associado ao tipo de máquinas utilizadas e em função da produtividade de madeira.

De acordo com Machado (2002), o sistema de colheita florestal pode ser definido como um conjunto de atividades para o fornecimento constante de madeira para a fábrica e variam em função do relevo, do padrão e produção da floresta, sortimento e uso final da madeira e das máquinas e equipamentos disponíveis. Os sistemas podem ser classificados quanto à forma da madeira manipulada na fase de extração, do local de processamento, e do grau de mecanização.

Mattsson (1979) pesquisou a relação entre dois sistemas de colheita, o grau de mecanização com o dispêndio energético total para se colher florestas nas condições suecas. Como resultado, verificou que em média gastou-se $70MJ.m^{-3}$ em 1956 e $180MJ.m^{-3}$ em 1972 aumento este devido

à mecanização das operações. Contabilizou ainda, o dispêndio de $123,8MJ.m^{-3}$ no sistema mecanizado e $58,3MJ.m^{-3}$ no semi-mecanizado, tendo o consumo de combustível representado entre 5 a 10% dos custos totais de colheita de madeira.

Börjesson (1996) verificou que a produtividade da energia líquida na produção de floresta de curta rotação de *Salix* spp foi de 160 a $170GJ.ha^{-1}.ano^{-1}$. A entrada de energia por unidade de biomassa produzida foi mais baixa para os resíduos de *Salix*, o equivalente a 4 ou 5% da energia de saída. Ainda segundo o autor, a distância de transporte viável para os cavacos de madeira de *Salix* podem ser transportados por caminhão por até 250 quilômetros, antes que a energia do transporte seja igual à energia da produção dos cavacos. As distâncias correspondentes para o trator, o trem e o barco (transporte litoral) foram aproximadamente 100, 500 e 1000 quilômetros, respectivamente.

Athanassiadis *et al.* (2002) contabilizaram, a partir do consumo de combustível, que a entrada energética pela colheita de madeira nas condições suecas foi de $82MJ.m^{-3}$. Desse total, 11% são devidos à energia gasta no estágio de extração e refino do combustível. Os autores consideram que do investimento energético na atividade de colheita, 40% é dado pelo uso de combustível fóssil.

Berg e Lindholm (2004) inventariaram o uso da energia em operações florestais na Suécia entre 1996 e 1997, envolvendo todas as operações, incluindo a produção de mudas, silvicultura, colheita e transporte principal até a indústria. O uso da energia foi de 150 a $200MJ.m^{-3}$ de madeira dependendo da região do país. Esse inventário demonstrou que o dispêndio energético do transporte principal foi maior que o verificado na década passada. Em contraste, o dispêndio na colheita foi menor se comparado ao mesmo período passado, possivelmente devido à melhor tecnologia e manejo.

Para as condições do setor florestal brasileiro foram verificados poucos trabalhos, alguns dos quais não relatam as operações de colheita ou apenas contabilizam a silvicultura (SERRA *et al.*, 1978; SERRA *et al.*, 1979 e SUITER FILHO *et al.*, 1982).

Damen (2001) estimou para as condições brasileiras, o dispêndio energético com base no diesel gasto por tonelada de madeira colhida, com valores de 1996, voltados à produção de eucalipto para o setor de celulose e papel. As entradas de energia para o módulo de colheita mecanizada, com "feller-buncher", "skidder" e gar-

ra-traçadora foram aproximadamente 123MJ.t⁻¹. O autor considerou o custo de colheita em US\$ 8.11 por tonelada seca de madeira, calculando-se custo energético de US\$ 1.08.GJ⁻¹.

Seixas (1997) comparou os efeitos causados sobre a brotação do eucalipto pelas máquinas utilizadas no sistema mecanizado de colheita. No comparativo entre o módulo mecanizado, composto por "feller-buncher" e "skidder" e o módulo semi mecanizado composto por motosserra e extração com caminhão, o sistema mecanizado causou maior impacto. Em levantamento semelhante, o autor comparou o sistema de toras curtas ("harvester" e "forwarder") com o de toras longas ("feller-buncher" e "skidder"), concluindo sobre a vantagem do "harvester" sobre as demais máquinas.

Segundo Seixas e Oliveira Júnior (2001), no Brasil predominam dois sistemas utilizados na colheita florestal, cujos módulos foram desenvolvidos em função dos tipos de máquinas e manipulação da madeira: o sistema escandinavo "cut-to-length" (toras curtas) e o sistema norte americano "tree-length" (toras longas), tendo verificado que ambos os módulos de colheita podem provocar distúrbios ao solo dependendo das condições de umidade e do relevo. Os autores alertam para evitar a generalização do conceito de que o módulo "feller-buncher" e "skidder" causem mais danos que o "harvester" e "forwarder" em termos de compactação.

Segundo Cardoso (2004), a Veracel busca a redução de 35% nos custos de colheita modificando o módulo mecanizado do sistema de toras curtas para o de toras longas, mas somente será implementada se mantiver ou reduzir os níveis de impactos em relação ao atual processo. Os principais impactos considerados são: a exportação de nutrientes, o teor de matéria orgânica no solo e a eficiência energética das operações, este último medido pelo consumo de combustíveis e lubrificantes em relação ao volume de madeira produzida em cada sistema (l.m⁻³).

A interface da colheita mecanizada com novos plantios busca a otimização dos recursos com a diminuição do consumo energético (diesel, gasolina e óleo lubrificante) e diminuição da emissão de CO₂ como forma de adequação aos processos de certificação, tais como; ISO 9001 (qualidade), ISO 14001 (ambiente), OHSAS 18001 (segurança e saúde ocupacional), CERFOR e FSC (manejo florestal) e Normas de Gestão Social (CARDOSO, 2004 e VOJCIECHOVSKI *et al.*, 2004).

Vojciechovski *et al.* (2004), citam alguns indicadores utilizados nas empresas Masisa e Terranova, denominando-os de "indicadores ambientais de eco-eficiência" aplicados nas atividades de silvicultura e colheita, como forma de medição e controle do desempenho ambiental para essa adequação, são eles: consumo de energia (kWh), consumo de água (m³), rejeitos sólidos (t) e emissão de CO₂ (t).

Nota-se a preocupação de avaliar de algum modo a energia dispendida nas operações e relacioná-la como medida do desempenho ambiental nas atividades florestais. No entanto, os trabalhos não têm focado o impacto do dispêndio de energia das operações em cada sistema mecanizado utilizado na colheita de eucalipto.

O total de energia necessária para realização da atividade em cada sistema de colheita será diretamente proporcional ao número de operações envolvidas, considerando-se o desempenho e capacidade das máquinas em cada módulo. Na colheita mecanizada supõe-se que haja diferenças entre os sistemas quanto ao dispêndio de energia nas operações devido ao tipo de máquinas utilizadas nos módulos. Assim, como em termos econômicos, também em termos energéticos deve haver uma grande participação da operação de transporte em relação ao total da atividade de colheita.

O objetivo foi analisar o consumo de energia investida nas operações de corte, transporte primário e processamento em dois sistemas de colheita mecanizada: o de toras longas e o de toras curtas e, também identificar os fatores de maior influência em cada operação, estabelecer qual a relação do dispêndio energético da atividade de colheita em relação ao transporte da madeira e com o potencial energético da madeira produzida ao final do ciclo.

METODOLOGIA

Foi montada uma matriz para o cálculo do dispêndio de energia das operações mecanizadas na atividade de colheita em dois sistemas, toras curtas e toras longas, e analisadas conforme a demanda de energia para a sua realização, considerando-se uma floresta de eucalipto padrão do setor de celulose e papel, com atividades mecanizadas e produção de 300m³.ha⁻¹ de madeira ao final de sete anos.

Foram visitadas e consultadas as empresas no ano de 2003 e 2004, Cenibra, Votorantim e International Paper, as quais utilizam o sistema toras longas e a Duratex, única que adotava o

sistema de toras curtas com casca na região Sudeste, compreendendo os Estados de São Paulo e Minas Gerais, nas quais foram selecionadas áreas com condições semelhantes de plantio e volume individual por árvore médio de 0,18m³.

Os dados de capacidade operacional e consumo de combustível representam o desempenho de oito módulos mecanizados, totalizando vinte e duas máquinas. Os dados médios considerados de cada empresa referem-se ao ano de 2003 e contabilizam a média geral da produtividade das máquinas na colheita de um hectare de eucalipto com padrão semelhante. As máquinas foram agrupadas de acordo com Doering (1980) pela potência e massa em cada sistema de colheita, obtendo-se a média geral do desempenho em cada módulo para evitar comparações de capacidade operacional entre as marcas comerciais ou de produtividade entre empresas.

Materiais

A energia direta foi classificada em: biológica do trabalho humano e a energia do combustível. Considerou-se energia indireta, a depreciação energética das máquinas que, como produtos manufaturados tiveram um consumo de energia para serem construídas; considerou-se também o tempo gasto (horas) e a massa da máquina utilizada na operação. Assim, tem-se a depreciação da energia indireta gasta.

Descrição da colheita

Em ambos os sistemas o produto final posto carreador são toras de 2,20m com casca para transporte rodoviário dispostas no sentido transversal.

No sistema de tora curta considerado, o módulo é composto por "harvester" máquina base Volvo e "forwarder" máquina base Timberjack 1210B. No sistema de tora longa, o módulo tem como máquinas "feller-buncher" Timberjack 608L, "clambunk-skidder" Timberjack 1710 e Garra traçadora Timberjack 608B.

O módulo típico no sistema de tora curta é composto pelas máquinas ilustradas na Figura 1: o "harvester" corta e processa cada árvore individualmente dentro da área, deixando o resíduo e as toras distribuídos em faixas. O "forwarder" faz a extração das toras, empilhando-as na margem do carreador.

O módulo típico no sistema de tora longa é composto pelas máquinas ilustradas na Figura 2. A seqüência das operações é iniciada pelo "feller-buncher" que corta e acumula, em seu cabeçote de corte, as árvores e em seguida as deposita em feixes ao longo da área. O arraste desses feixes é feito pelo "clambunk-skidder" até a margem do carreador onde são processadas pela garra traçadora, empilhando as toras ao longo dos carreadores.



Figura 1. Máquinas utilizadas na colheita mecanizada no sistema tora curta, (a) "harvester" e (b) "forwarder". (Harvesting machinery in cut to length systems, (a) harvester and (b) forwarder)



Figura 2. Máquinas utilizadas na colheita mecanizada no sistema tora longa, (a) "feller - buncher", (b) "clambunk" e (c) "garra traçadora". (Logging machinery used in the tree length system, (a) feller - buncher, (b) skidder and (c) slacher)

Descrição do transporte principal

A operação de transporte foi realizada com composição veicular combinada (CVC) denominada bitrem, composto por caminhão trator e dois semi-reboques acoplados, com sete eixos no total. O desempenho e capacidade foram calculados para uma distância média de 120km e peso bruto total combinado-PBTC de 57t. O ponto de carregamento é nas estradas ou carreadores principais e o descarregamento na fábrica. Os desempenhos foram estimados a partir dos dados de Seixas e Oliveira Junior (2004).

Métodos

Nesta análise as entradas de energia foram classificadas e quantificadas, conforme a fonte, considerando-se as características das máquinas, desempenho por operação, com máquinas e com mão de

obra, além do consumo de combustível em cada atividade do empreendimento florestal conforme esquematizado no organograma da Figura 3.

No cálculo matricial, as entradas de energia foram organizadas no vetor denominado "vetor entradas", que corresponde às intensidades energéticas de cada fluxo de energia. Já o tempo operacional (h.ha⁻¹) e consumo de combustível (l.ha⁻¹) foram organizados na matriz, denominada "matriz consumo" de acordo com Sartori e Basta (1999). Multiplicando-se o vetor de entradas energéticas pela matriz consumo tem-se como resultado um vetor com os valores do dispêndio energético em cada atividade, podendo ser expressos em unidades de energia por metro cúbico ou por hectare (J.m⁻³ ou J.ha⁻¹). O exemplo da Figura 4 mostra como foram organizados os dados do vetor entradas e da matriz consumo.

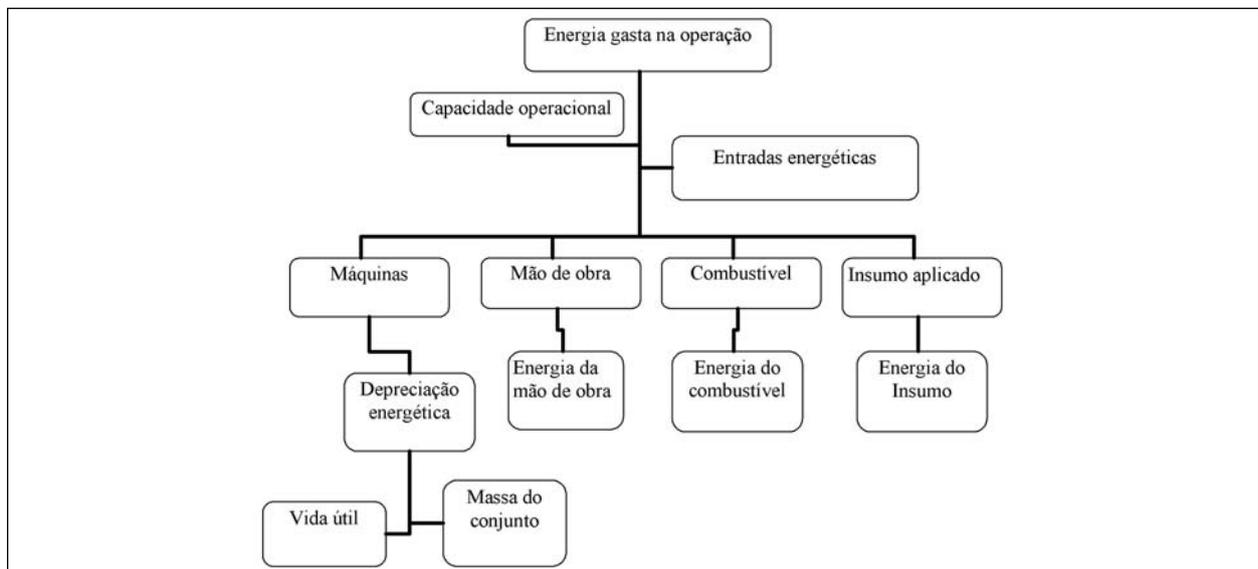


Figura 3. Organograma das entradas de energia na operação. (Organization of energy inputs in operations)

Vetor entradas	X Matriz	consumo	=	Vetor	resposta		
	Mão de obra	Máquina1	Máquina2	Diesel			
Vetor entradas	(MJ.h ⁻¹)	(MJ.h ⁻¹)	(MJ.h ⁻¹)	(MJ.l ⁻¹)			
Mão de obra	(h.m ⁻³)						
Máquina 160kW	(h.m ⁻³)						
Máquina 180kW	(h.m ⁻³)						
Óleo diesel	(l.m ⁻³)						
	harvester	forwarder	feller	skidder	traçador	carga	transporte
Vetor resposta	(MJ.m ⁻³)						

Figura 4. Exemplo das entradas na matriz e do vetor no cálculo matricial do dispêndio energético. (Exemplar of matrix and vector inputs of energy required)

As máquinas utilizadas em cada sistema de colheita foram depreciadas em termos de energia agregada, contabilizando-se a matéria prima usada, a energia consumida na fabricação, com reparos e manutenções ao longo da vida útil. Foram consideradas nos cálculos a massa e potência das máquinas e seu uso anual, conforme metodologia proposta por Doering (1980) e descrita pela equação 1.

$$IE_{ma} = (Ef + Em + Er) \cdot m \cdot 0,333 \cdot RM \cdot Vu_{0,82}(I)$$

onde:

IE_{ma} = intensidade energética para as máquinas ($MJ \cdot h^{-1}$);

Ef = valor energético utilizado para fabricação ($MJ \cdot kg^{-1}$);

Ema = valor energético do material utilizado ($MJ \cdot kg^{-1}$);

Er = energia gasta com reparos e manutenção ($MJ \cdot kg^{-1}$);

m = massa (kg);

$Vu_{0,82}$ = 82% de vida útil (h);

RM = coeficiente de correção para reparos e manutenções.

RESULTADOS

Os resultados da capacidade operacional das máquinas são apresentados na Tabela 1, considerando-se esses valores para o cálculo.

O resultado do cálculo energético apresen-

tado na Tabela 2 mostra que as máquinas de maior potência apresentaram maior valor de energia agregada por hora, principalmente em função da massa. Essa diferença nos dados de depreciação energética foi considerada nas entradas de energia utilizadas nos cálculos.

Cálculo matricial das atividades de colheita e transporte

O vetor entradas e matriz consumo são mostrados na Figura 5, o vetor resposta indica o dispêndio energético por tipo de máquina usada e, para se obter o valor final de cada módulo, é feita a soma desses valores. O mesmo é apresentado para a atividade de transporte, considerando-se as operações de carregamento e descarregamento como sendo uma única operação de carga. Os valores expressam o dispêndio de energia para se manipular um metro cúbico de madeira. Pela soma dos valores no vetor resposta (Figura 5), obtiveram-se os seguintes dispêndios de energia em cada sistema estudado, como mostra a Figura 6.

O sistema de toras longas apresentou um consumo de energia cerca de 20% maior, quando comparado ao de toras curtas.

Considerando-se o Poder calorífico superior - PCS - da madeira igual a $19GJ \cdot t^{-1}$, tem-se que investimento energético da colheita é cerca de 0,5% do potencial energético existente no plantio florestal.

Tabela 1. Capacidade operacional e consumo das máquinas em cada sistema de colheita. (Performance and consumption of both harvesting systems)

Sistema	Operação	Máquina	CO ($m^3 \cdot h^{-1}$)	Diesel ($l \cdot m^{-3}$)
Tora curta	Corte e processo	"Harvester"	35,4	0,53
	Extração	"Forwarder"	42,8	0,40
Tora longa	Corte	"Feller – buncher"	74,9	0,39
	Extração	"Clambunk – skidder"	55,5	0,40
	Processo	Garra traçadora	57,0	0,33
	Carregamento	Grua de esteira	34,4	0,32
Transporte	Transporte rodovia	Veículo Bitrem	6,9	0,94
	Descarregamento	Garra estacionária	80,0	0,32

CO = capacidade operacional

Tabela 2. Depreciação energética das máquinas utilizadas na colheita de eucalipto. (Energy sequestered in harvesting of *Eucalyptus*)

Máquina	Massa (t)	Potência (kW)	V.útil (anos)	Uso ($h \cdot ano^{-1}$)	$E_{contida}$ ($MJ \cdot h^{-1}$)	E_{fabric} ($MJ \cdot h^{-1}$)	E_{RM} ($MJ \cdot h^{-1}$)	Ajuste ($MJ \cdot h^{-1}$)	Total ($MJ \cdot h^{-1}$)
Harvester	19,5	160	5	6000	32,7	9,5	10,4	34,6	45,0
Forwarder	19,5	160	5	6000	32,7	9,5	10,4	34,6	45,0
Feller	27,2	180	5	6000	45,5	13,2	14,5	48,2	62,7
Skidder	19,5	160	5	6000	32,7	9,5	10,4	34,6	45,0
Garra	27,1	180	5	6000	44,8	13,2	14,3	47,6	61,9

$E_{contida}$ = energia agregada na matéria prima; E_{fabric} = energia agregada na fabricação; E_{RM} = coeficiente de energia para reparos e manutenções

Vetor entradas	X Matriz	consumo	=	Vetor	resposta			
	(MJ.h ⁻¹)	(MJ.h ⁻¹)	(MJ.h ⁻¹)	(MJ.l ⁻¹)				
Vetor entradas	2,2	45	62	38				
Matriz consumo								
Mão de obra	0,028	0,023	0,013	0,018	0,018	0,018	0,145	(h.m ⁻³)
Máquina 160kW	0,028	0,023	0,000	0,018	0,000	0,000	0,145	(h.m ⁻³)
Máquina 180kW	0,000	0,000	0,013	0,000	0,018	0,018	0,145	(h.m ⁻³)
Óleo diesel	0,53	0,40	0,39	0,40	0,33	0,32	0,94	(l.m ⁻³)
	harvester	forwarder	feller	skidder	traçador	carga	transporte	
Vetor resposta (MJ.m ⁻³)	21,46	16,30	15,65	16,05	13,70	13,28	51,54	

Figura 5. Cálculo matricial do dispêndio energético na atividade de colheita e transporte. (Energy account in harvesting and transportation operations)

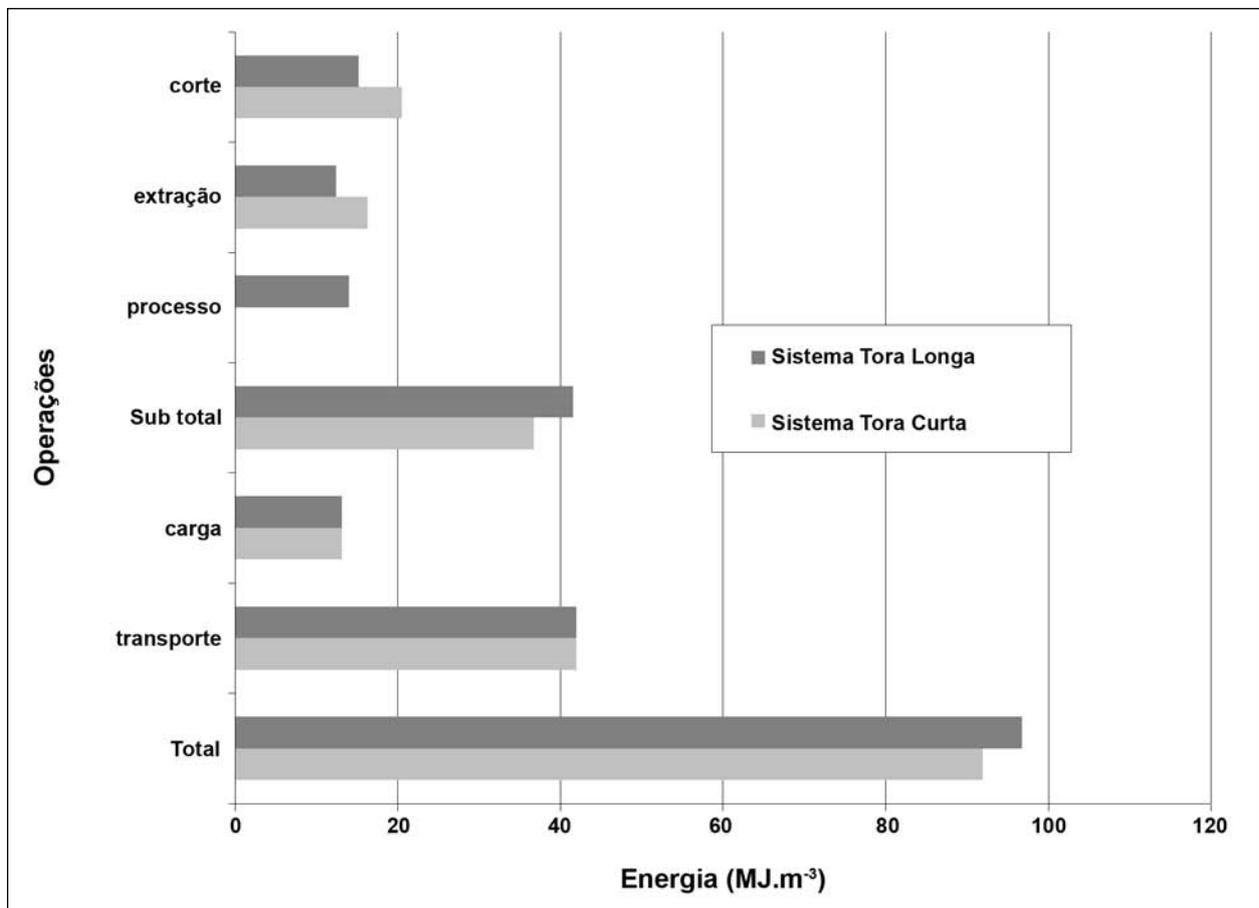


Figura 6. Dispêndio energético final das operações em cada sistema de colheita. (Energy account of operations in both harvesting systems)

DISCUSSÃO

O maior consumo de energia em ambos os sistemas de colheita mecanizada foi devido ao fluxo de energia direta proveniente do consumo de combustível, 93,3% do total. Em menor demanda foi verificada a exigida pelo trabalho humano, 0,6% do total, indicando que nesta metodologia a mão de obra não é fator limi-

tante do ponto de vista energético. Desta forma, sugere-se que em trabalhos cujo enfoque seja contabilizar a influência econômica e energética da mão de obra, considerar o padrão de vida de acordo com a hierarquia dos trabalhadores.

A depreciação energética teve uma participação média de 6,4% do total para os dois sistemas e não foi associada à potência das máquinas, mas sim à massa, devido ao método utilizado con-

forme proposto por Doering (1980), indicando ainda que reparos e manutenção não foram de grande dispêndio do ponto de vista energético, mas segundo Fluck (1985) existe o componente assistência técnica, cujo valor é difícil de ser mensurado pela análise energética.

Verificou-se que houve influência do tamanho e potência das máquinas na demanda de energia por operação, assim como verificado por Bridges e Smith (1979). Quando consideradas as operações de corte e processo (feitas pelo "harvester") houve 55,7% da demanda energética na colheita, enquanto que a extração, os 44,3% restantes. Já no sistema de toras longas, as operações de corte e processo (feitas pelo "feller-buncher" mais garra traçadora) requereram 70,1% da energia total e os 29,9% restantes para a extração. Houve uma melhor distribuição da demanda de energia no primeiro sistema, enquanto que no segundo a demanda concentrou-se nas operações de corte e processo.

A produtividade da máquina foi o fator de maior influência na demanda de energia por operação: se por um lado o sistema de toras longas é mais produtivo, por outro, pode representar limitações de ordem ambiental, tais como arraste de matéria orgânica e danos ao solo. Sugere-se estudar a influência do aumento da capacidade de carga do "forwarder" no sistema de toras curtas como forma de aumentar sua eficiência energética. Para o sistema de toras longas deve-se ponderar entre a maior capacidade operacional versus maior demanda energética e seus impactos ambientais.

O dispêndio energético do transporte rodoviário foi da mesma ordem de grandeza que do sistema de toras longas e foi maior do que o de toras curtas. Devido a essa grande participação, a possibilidade de haver uma relação entre demanda de energia e emissão dos gases do efeito estufa poderá ser investigada em novas pesquisas, utilizando-se o ciclo de vida das máquinas conforme as atividades e experimentar os benefícios, ou não, dos biocombustíveis e suas interações com a energia agregada nas operações florestais. Assim, o maior controle das operações que envolvam consumo de diesel deve ser priorizado também na gestão dos recursos energéticos.

Dos trabalhos consultados sobre balanço energético e análise energética no setor florestal (Athanassiadis *et al.*, 2002, Börjesson, 1996; Damen, 2001; Serra *et al.*, 1979 e Suiter Filho *et al.*, 1982) este trabalho permite utilizar a mesma metodologia para comparar diferentes sistemas

de colheita independente do módulo mecanizado utilizado. O cálculo matricial foi eficaz, devendo-se detalhar o nível de entradas necessárias para a operação desejada.

Fica evidente neste tipo de análise, a possibilidade da utilização de indicadores ambientais (eficiência energética) na seleção de sistemas mecanizados a serem adotados pela empresa e também para monitorar impactos das operações terceirizadas.

CONCLUSÕES

Em ambos os sistemas de colheita, a maior demanda energética foi devida ao consumo de combustível, 93,3% do investimento energético total, enquanto que o trabalho humano teve a menor participação com 0,6% daquele total.

As operações de corte e processamento foram as de maior demanda energética na colheita, sendo que no sistema de toras longas houve maior concentração por exigir duas máquinas ao invés de uma, se comparado ao sistema de toras curtas.

Os fatores de maior influência são: o consumo de combustível, massa e número de máquinas utilizadas, bem como o desempenho operacional do módulo de colheita.

O maior número de máquinas e de maior massa implica em maior dispêndio energético, devendo-se atentar para esta metodologia na modulação das máquinas e seus desempenhos.

A colheita pelo sistema de toras longas apresentou consumo de energia 20% maior quando comparado ao sistema de toras curtas.

O transporte rodoviário tem grande demanda energética na mesma ordem de grandeza que na colheita realizada pelo sistema de toras longas.

Do ponto de vista tecnológico, a energia investida nas operações é proporcional nos dois sistemas, mas em termos de eficiência energética em relação aos fluxos de entradas e saídas, o investimento energético no sistema de toras curtas equivale a 0,39% da produção energética da floresta produzida e no sistema de toras longas 0,48%. Essa diferença corresponde ao equivalente energético de um litro de óleo diesel por metro cúbico de madeira colhida, que passa a ser relevante quando considerado o volume total de madeira movimentada anualmente pelas empresas do setor.

Para cada empresa deve-se avaliar o consumo energético específico em suas condições operacionais de modo a complementar as tomadas de decisões e suas implicações no longo prazo em termos energéticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas visitadas, Cenibra, Duratex International Paper e VCP. Agradecem também à Capes pelo apoio financeiro e bolsa concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATHANASSIADIS, D.; LIDESTAV, G.; NORDFJELL, T. Energy use and emissions due to the manufacture of a forwarder. **Resource, conservation and recycling**, Amsterdam, v.34, p.149-160, 2002.
- BERG, S., LINDHOLM, E.L. Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v.13, n.1, p.33-42, 2004.
- BÖRJESSON, P. Energy analysis of biomass production and transportation. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v.11, n.4, p.305-318, 1996.
- BRIDGES, T.C.; SMITH, E.M. A method for determining the total energy input for agricultural practices. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.22, p.781-784, 1979.
- CARDOSO, M.N.M. Terceirização da colheita com responsabilidade sócio ambiental. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, Curitiba, 2004. **Anais**. Curitiba: UFPR, 2004. p.1-26.
- DAMEN, K. **Future prospects for biofuel production in Brazil: a chain analysis comparison of ethanol from sugarcane and methanol from Eucalyptus in São Paulo State**. Utrecht: Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation. Department of Science Technology and Society, 2001. 68p.
- DOERING, O.C. Accounting for energy in farm machinery and buildings. In: PIMENTEL, D. (Ed.) **Handbook of energy utilization in agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. 475p.
- FLUCK, R.C. Energy sequestered in repairs and maintenance of agricultural machinery. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.28, n.3, p.738-744, 1985.
- KRONKA, F.J.N.; NALON, M.A.; MATSUKUMA, C.K.; PAVÃO, M.; YWANE, M.S.S.I.; KANASHIRO, M.M.; LIMA, L.M.P.R.; PIRES, A.S.; SHIDA, C.N.; FUKUDA, J.C.; COUTO, H.T.Z. Mapeamento e quantificação do reflorestamento no Estado de São Paulo. **Florestar Estatístico**, São Paulo, v.6, n.14, p.19-27, jan. 2003.
- MACHADO, C.C. **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, 2002. 468p.
- MATTSSON, J.E. Energy of forest machines and in Swedish forestry as a whole. In: SEMINAR ON ENERGY ASPECTS OF THE FOREST INDUSTRIES, Udine, 1979. **Proceedings**. Oxford: Pergamon Press, 1979. p.321-330.
- MONTEITH, O. Accounting for energy in farm machinery and buildings. In: PIMENTEL, D. (Ed.) **Handbook of energy utilization in agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. 475p.
- SARTORI, M.M.P.; BASTA, C. Métodos matemáticos para o cálculo energético da produção de cana de açúcar. **Energia na Agricultura**, Piracicaba, v.14, n.1, p.52-68, 1999.
- SEIXAS, F. Potencial de danos dos sistemas de colheita de madeira no solo e nas cepas. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, n.30, p.63-78, 1997.
- SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.60, p.73-87, 2001.
- SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. **Comparativo do custo de composições rodoviárias no transporte de madeira: relatório Cenibra**. Piracicaba: IPEF, 2004. 12p. (não publicado).
- SERRA, G.E.; GOLDEMBERG, J.; MOREIRA, J.R.; CARVALHO, M.C. Estudo energético de alternativas brasileiras para produção de energia renovável. In: CONVENÇÃO UPADI, Santiago, 1978. **Proceedings**. Santiago: UPADI, 1978. p.378-417.
- SERRA, G.E.; HEEZEN, A.M.; MOREIRA, J.R.; GOLDEMBERG, J. **Avaliação da energia investida na fase agrícola de algumas culturas: relatório final**. Brasília: Ministério da Indústria e Comércio. Secretaria de Tecnologia Industrial, 1979. 86p.
- STAPE, J.L. **Pesquisa busca maior retorno das áreas de reflorestamento**. Disponível em: <<http://www.ipef.br/servicos/clipping/007-2003.html>> . Acesso em: 26 fevereiro 2003.
- SUITER FILHO, W; REZENDE, G.C; TONINELLO, S.L; DABÉS, A.D. Considerações sobre o balanço energético de florestas de eucalipto. **Silvicultura**, São Paulo, v.8, n.28, p.887-890, 1982.
- VOJCIECHOVSKI, G.C.; SCHUCHOVSKI, M.S.; FOLLETO, V.D.F. Interface da colheita com novos plantios. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, Curitiba, 2004. **Anais**. Curitiba: UFPR, 2004. p.395-409.

Recebido em 02/02/2005

Aceito para publicação em 22/02/2006

