

# COLHEITA DE RESÍDUOS FLORESTAIS PARA BIOENERGIA NOS EUA<sup>1</sup>

Robert Rummer<sup>2</sup>; Fernando Seixas<sup>3</sup>

## Resumo

O potencial de produção de energia a partir da biomassa florestal tem aumentado os esforços na busca de alternativas economicamente viáveis para a colheita de resíduos florestais e árvores de menor porte. Nos Estados Unidos, os principais motivadores dessa opção pela energia de biomassa são os altos custos de energia e a dependência da importação de parte do estoque energético. O futuro do desenvolvimento da indústria de energia a partir da biomassa depende essencialmente da obtenção da matéria-prima a custos viáveis economicamente. As diferentes fontes de biomassa incluem resíduos da colheita, resíduos primários da indústria de produtos florestais, material de desbastes, plantações energéticas de curta rotação e resíduos urbanos de madeira. Um terço desse suprimento virá de resíduos industriais e outras fontes importantes são os desbastes para redução do perigo da ocorrência de incêndios e os resíduos da colheita de madeira. Cada uma dessas fontes de matéria-prima tem seu próprio conjunto de custos operacionais e tecnologias de colheita. Esse trabalho revisa aspectos importantes dos métodos atuais de colheita de biomassa e aponta alguns desafios.

## Abstract

Potential biomass energy production has renewed interest in finding cost effective operations to get forest biomass out of the woods. In the United States the principal driver has been raising energy prices and the associated concern about dependence on imported energy stocks. The future of the developing biomass energy industry depends on getting the biomass feedstock from the forest at an acceptable price. Most of the resource assessments recognize that there are different forms of woody biomass including logging residues, primary mill residues, thinning material, short rotation energy crops, and urban wood waste. The national assessment suggests that most of the available woody biomass would come from primary mill residues (about one-third). Thinning for fire hazard and other purposes would be the next most significant source and logging residues would be third in importance. Each of these unique feedstock sources has its own set of operating costs and harvesting technologies. This paper reviews key assumptions about current harvesting methods for forest biomass and outlines some of the critical challenges.

---

<sup>1</sup> Trabalho publicado nos Anais do VIII Simpósio Brasileiro sobre Colheita e Transporte Florestal. Uberlândia: SIF, 7 a 10 de outubro de 2007. P. 19-40.

<sup>2</sup> Project Leader - USDA Forest Service, Southern Research Station, 520 Devall Drive, Auburn, AL, 36849,USA. E-mail: [rrummer@fs.fed.us](mailto:rrummer@fs.fed.us)

<sup>3</sup> Pesquisador visitante junto ao USDA Forest Service, 520 Devall Drive, Auburn, AL, 36849,USA. Beneficiário de auxílio financeiro da CAPES – Brasil. E-mail: [fseixas@esalq.usp.br](mailto:fseixas@esalq.usp.br)

## 1. INTRODUÇÃO

As diversas fontes de biomassa recentemente ultrapassaram a energia hidrelétrica como o maior fornecedor doméstico de energia renovável e são responsáveis por 3 por cento do total de consumo de energia nos Estados Unidos (EIA, 2006). Um pouco mais de 75 por cento desse consumo total de biomassa (cerca de 142 milhões de toneladas secas) são oriundos de florestas. O restante (48 milhões de toneladas secas), que inclui produtos de base biológica, biocombustíveis e resíduos de biomassa, provém de culturas agrícolas. Sua crescente importância, aliada ao aumento dos custos de energia e dependência externa, fez com que o Congresso norte-americano editasse alguns princípios norteadores para futuros investimentos em P&D na área de biomassa, com vistas à substituição, no ano de 2030, de 30 por cento do consumo atual de petróleo por biocombustíveis. Para atingir essa meta, será necessária a produção anual de 1 bilhão de toneladas secas de biomassa, das quais 368 milhões serão oriundos da biomassa florestal (Perlack et al., 2005). Grande parte desse total poderá ser obtido de árvores de menor porte, geralmente utilizadas como lenha para residências e produção de eletricidade para o comércio e indústria, resíduos florestais produzidos na colheita e operações de limpeza de área, que geralmente não são explorados, e quantidades significativas de resíduos florestais que podem ser coletados quando da aplicação de tratamentos silviculturais para redução do risco da ocorrência de incêndios.

O setor industrial é o consumidor mais importante de madeira para energia, com 73 por cento do total de energia produzida da madeira, mas esse consumo reduziu-se em 12 por cento entre os anos de 2000 e 2004 (Tabela 1). Contudo, essa situação poderá se alterar no futuro próximo, porque o preço da madeira para energia está aumentando a uma razão maior do que os preços de toras e madeira serrada em si (Figura 1). Mesmo assim, as condições de mercado no sul dos EUA, com a maior área florestal do país, não vêm apresentando melhoras, com quase todos produtos florestais, com a exceção da polpa de Pinus, tendo reduções de preço ano após ano (Figura 2).

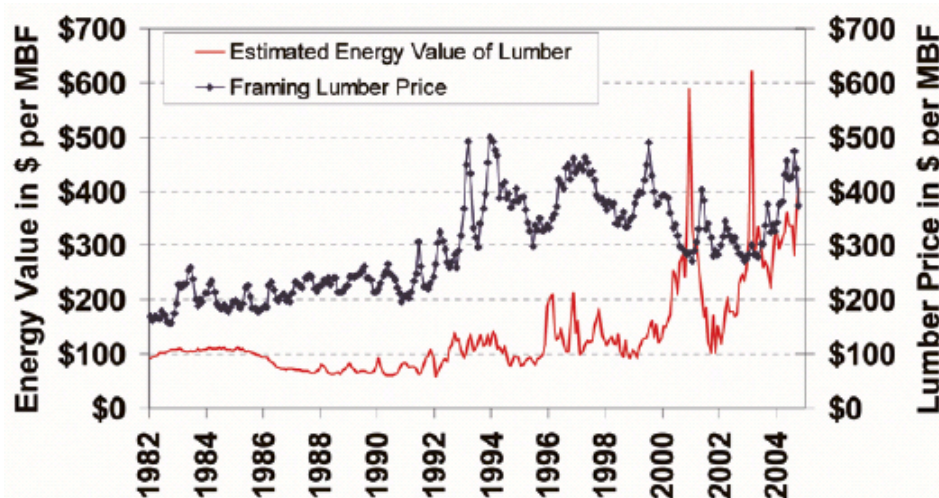


Figura 1. Valor estimado de madeira para energia vs. preços da madeira serrada nos EUA (Wegner, 2006)

Tabela 1. Consumo histórico de energia renovável por setor e biomassa e madeira como fonte de energia, 2000-2004 (Quadrilhões de Btu) (EIA, 2005)

<b>Setor e Fonte de Energia</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>
<b>Total</b>	<b>6,158</b>	<b>5,328</b>	<b>5,835</b>	<b>6,082</b>	<b>6,117</b>
Biomassa	2,907	2,640	2,648	2,740	2,845
Madeira	2,257	1,980	1,899	1,929	1,989
<b>Residencial</b>	<b>0,503</b>	<b>0,439</b>	<b>0,382</b>	<b>0,434</b>	<b>0,408</b>
Biomassa	0,433	0,370	0,313	0,359	0,332
Madeira	0,433	0,370	0,313	0,359	0,332
<b>Comercial</b>	<b>0,109</b>	<b>0,089</b>	<b>0,090</b>	<b>0,102</b>	<b>0,106</b>
Biomassa	0,100	0,080	0,081	0,087	0,089
Madeira	0,053	0,040	0,039	0,040	0,041
<b>Industrial</b>	<b>1,828</b>	<b>1,630</b>	<b>1,608</b>	<b>1,581</b>	<b>1,676</b>
Biomassa	1,781	1,593	1,565	1,533	1,620
Madeira	1,636	1,443	1,396	1,363	1,448
<b>Transporte</b>	<b>0,139</b>	<b>0,147</b>	<b>0,174</b>	<b>0,239</b>	<b>0,296</b>
<b>Setor Elétrico</b>	<b>3,579</b>	<b>3,023</b>	<b>3,581</b>	<b>3,725</b>	<b>3,632</b>
Biomassa	0,021	0,019	0,049	0,036	0,029
Madeira	0,007	0,006	0,011	0,017	0,012
<b>Produtores independentes de energia</b>	<b>0,972</b>	<b>0,956</b>	<b>1,036</b>	<b>1,103</b>	<b>1,127</b>
Biomassa	0,432	0,432	0,467	0,485	0,479
Madeira	0,127	0,121	0,140	0,151	0,155

O processamento de produtos florestais, como madeira para serraria e polpa, gera quantidades significativas de resíduos e licores na indústria, sendo a maior parte da biomassa em uso atualmente. Resíduos secundários gerados no processamento de produtos florestais respondem por 50 por cento do consumo atual de biomassa. Esses materiais são usados pela indústria de produtos florestais no gerenciamento do fluxo de resíduos, produção de energia e recuperação de produtos químicos importantes. A extração de lenha para residências, comércio e utilidades elétricas responde por 35 milhões de toneladas secas do consumo atual.

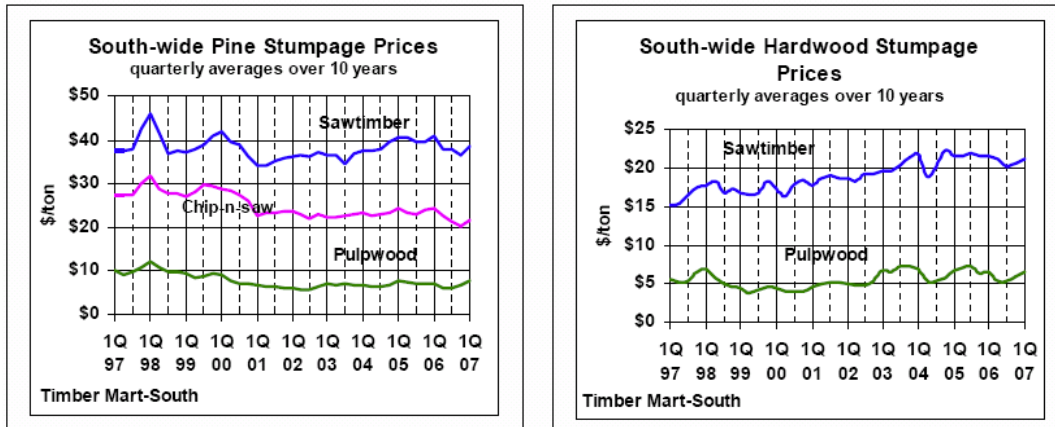


Figura 2. Preço de madeira em pé na região Sul dos EUA no período de 1997 a 2007 (Timber Mart-South, 2007).

Alguns pontos muito importantes são listados por Kirby et al. (2003), em ordem de importância, quanto ao favorecimento do uso da biomassa florestal para fins energéticos:

1. O recurso de biomassa deve estar disponível de maneira sustentável e a planta de produção de energia deve estar localizada em um raio de alcance de 80 km.
2. O povoamento florestal também deve estar em um raio de 80 km de um centro populacional com trabalhadores qualificados.
3. A proximidade de comunidades em regiões de risco, identificadas pelo National Fire Plan, favorece o uso de biomassa para energia.

Os seguintes itens também foram identificados, mas não estão entre os critérios mais importantes para a tomada de decisão: a) é necessário um suprimento de água; b) a inclinação do terreno deve estar entre 7 e 12 por cento, ou menos; c) o impacto visual pode ser um problema e as mudanças na paisagem causadas pela colheita devem ser levadas em conta; d) o controle de espécies invasoras pode favorecer a produção de biomassa; e) a proteção da fauna deve ser possível; f) a ocorrência de operações de desbaste e a disponibilidade de resíduos sólidos de madeira municipais são boas fontes potenciais; g) os custos de outras fontes de energia já são conhecidos e favorecem a biomassa.

Dados de Watson et al. (1987) reafirmam a importância da proximidade da usina de força da fonte de combustível. Os autores concluíram que o transporte de madeira a uma distância de 80 km requer três vezes mais combustível do que as operações convencionais de colheita florestal, sendo o item mais caro em termos de consumo de combustível.

Outro aspecto importante refere-se à disponibilidade de equipamentos próprios para a colheita de resíduos, o que muitas vezes pode inviabilizar a operação devido à impossibilidade de retorno econômico. Sistemas e equipamentos convencionais têm sido utilizados nos EUA para a colheita de árvores de menor porte. Essas operações são altamente mecanizadas, com as mais tradicionais utilizando feller-bunchers, skidders de garra e picadores com múltiplas funções (chain flail delimeter/debarker/chipper).

Contudo, essas máquinas algumas vezes não são econômicas quando usadas em sistemas de desbaste, quando o número de árvores por área é alto, mas a percentagem de volume nas árvores é baixo. Esse trabalho revisa aspectos importantes dos métodos atuais de colheita de biomassa e aponta alguns desafios.

## 2. O RECURSO FLORESTAL

A base territorial dos Estados Unidos compreende cerca de 905,2 milhões de hectares, incluindo os 147,6 milhões de hectares de terras no Alaska e Hawaii. Cerca de 33% dessa área é classificada como florestal, 26% como pastagens e campinas, 20% como terras agrícolas, 8% como usos especiais (ex. facilidades públicas) e 13% para os mais diversos usos como áreas urbanas, pântanos e desertos (Vesterby e Krupa, 2001; Alig et al., 2003). Cerca de metade dessas terras tem algum potencial para o crescimento de biomassa.

O total de área com florestas nos Estados Unidos é de aproximadamente 300 milhões de hectares, com a maior parte pertencente a particulares (58%) ou à indústria florestal (13%). Dois terços das áreas florestais (200 milhões de hectares) são classificadas como florestas de produção de madeira, capazes, de acordo com o Serviço Florestal, de crescer mais do que 1,4 m<sup>3</sup> de madeira por ha anualmente (Smith et al., 2004). 30,8 milhões de hectares remanescentes de florestas são preservados da colheita e destinam-se a uma variedade de usos não-madeireiros, como parques e habitat para a vida selvagem.

Uma análise recente mostrou que a remoção anual do estoque florestal totalizou cerca de 572 milhões de m<sup>3</sup>. Desse volume, 78% foram na forma de toras, 16% foram resíduos da exploração e um pouco mais do que 6% foram classificados como “outras remoções” (Smith et al., 2004). A remoção total anual constitui por volta de 2,2% do estoque florestal das florestas produtoras de madeira e menos do que o crescimento florestal anual líquido. Nas florestas do sudeste dos EUA, estima-se que 15% de todo o volume colhido dos povoamentos de coníferas sejam deixados para trás como resíduo, assim como 25% nos povoamentos de folhosas.

Nos Estados Unidos, o total de resíduos da exploração florestal e outras remoções atingem atualmente cerca de 67 milhões de toneladas secas anualmente; 49 milhões de toneladas secas de resíduos da exploração e 18 milhões da remoção de outros resíduos. Nem todo resíduo é potencialmente disponível para bioenergia ou bioprodutos. Geralmente, esses resíduos são partes relativamente pequenas consistindo de topos, ramos, pequenos galhos e folhas. Stokes reportou uma série de percentagens de recuperação, com um potencial médio de 60% a partir de sistemas de colheita florestal convencionais (Stokes, 1992). Com as novas tecnologias em uso, essa estimativa atingiria 65%. Outras remoções, especialmente de operações de limpeza de terras, usualmente produzem diferentes formas de resíduos e não são econômicas ou factíveis. Espera-se que somente a metade desses resíduos de outras remoções possa ser aproveitada e, ainda assim, nem toda ela, pois parte desse material, especialmente as folhas e parte da copa, devem ser deixadas no solo para reposição de nutrientes e manutenção da produtividade. As diversas limitações existentes reduzem a quantidade desse recurso florestal de 67

milhões para 41 milhões de toneladas secas anualmente, com a previsão de mais 23 milhões de toneladas secas em virtude do aumento da exploração florestal (Figura 3)..

Diversas áreas florestais dos EUA estão “sobrecarregadas” com grandes quantidades de material arbóreo. Esse excesso de material foi se acumulando nos últimos anos como resultado do crescimento florestal e de alterações nos ciclos naturais de incêndios. Nos últimos dez anos, agências federais têm gasto mais do que \$ 8.2 bilhões no combate a incêndios florestais, que consumiram mais do que 20 milhões de ha. O programa Fuel Treatment Evaluator, ou FTE (USDAFS, 2004), identificou nacionalmente cerca de 7,8 bilhões de toneladas secas de biomassa tratável em florestas de produção e outro 0,6 bilhão em outras áreas florestais. Somente uma fração desses aproximadamente 8,4 bilhões de toneladas secas é considerada potencialmente disponível para bioenergia e bioprodutos em bases sustentáveis anualmente, em virtude de disponibilidade de acesso e operacionalização dos sistemas de colheita. A combinação desses fatores reduz significativamente a quantidade de biomassa de tratamento combustível que pode ser removida anualmente de maneira sustentável. Cerca de 49 milhões de toneladas secas podem ser potencialmente removidas anualmente das florestas de produção de madeira e cerca de 11 milhões podem ser removidos anualmente de outras terras florestais (Perlack et al., 2005).

A estimativa final de produção de biomassa florestal para energia e bioprodutos inclui o atual consumo anual de 35 milhões de toneladas secas de lenha extraída das áreas florestais para fins residenciais, comerciais e equipamentos elétricos, 98 milhões de toneladas secas de resíduos gerados e utilizados pela indústria de produtos florestais e 8 milhões de toneladas secas de resíduos urbanos de madeira. Adicionalmente, existem ainda alguns resíduos inutilizados de usinas de processamento de madeira e madeira urbana, que totalizariam cerca de 36 milhões de toneladas secas anualmente. Incluem-se também os aumentos na produção de lenha (16 milhões de toneladas secas), resíduos da fabricação de produtos florestais (38 milhões de toneladas secas), resíduos urbanos de madeira (11 milhões de toneladas secas) (Perlack et al., 2005).

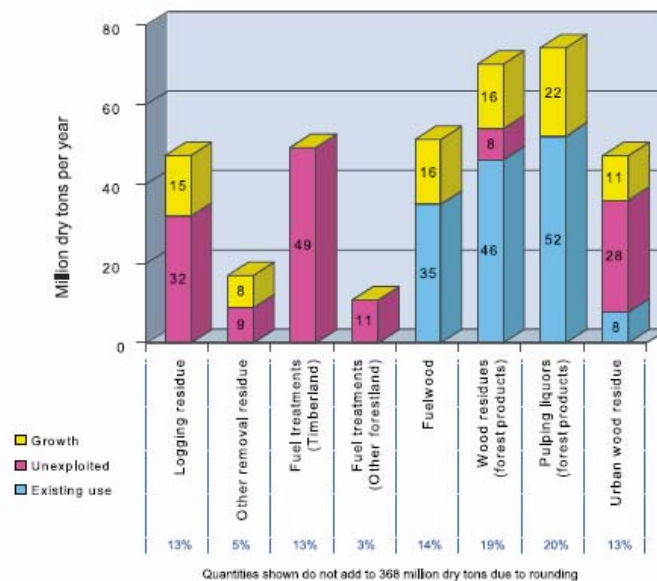


Figura 3. Resumo do potencial dos recursos florestais disponíveis (Perlack et al., 2005)

### 3. COLHEITA DE ÁRVORES DE MENOR PORTE E RESÍDUOS FLORESTAIS

O custo da recuperação de resíduos florestais depende do tipo de sistema de colheita empregado. Operações de colheita de árvores inteiras trazem todo o volume para uma área de estoque à margem do carreador ou estrada, onde as árvores serão processadas e depois carregadas. Em uma operação de colheita convencional sem a recuperação de resíduos, esses são empilhados na beira da estrada para queima ou posterior retornados e espalhados dentro do talhão. Qualquer alternativa gera custos sem adicionar volume. Westbrook et al. (2006) examinaram a adição de um picador pequeno a uma operação convencional de colheita para processar esses resíduos como parte integrante das operações. Eles encontraram que os resíduos da colheita poderiam ser produzidos pelo custo da operação do picador, mas havia um pequeno aumento quando biomassa adicional de sub-bosque era colhida para suplementar a produção do picador.

A maior parte dos sistemas de colheita envolvem a retirada dos resíduos em sistemas de árvores inteiras, mas novas máquinas como o Valmet 801 Bioenergy (Figura 4) oferecem a possibilidade da colheita integrada de lenha e outros produtos em sistemas de toras curtas. O trator 801 combina um cabeçote processador com um picador móvel. Esse harvester especial pode cortar e processar toras e depois transformar o material em cavacos diretamente em uma caixa de carga, com capacidade de 27 m<sup>3</sup> de cavacos, situada na parte de trás da máquina.



Figura 4. Valmet 801 BioEnergy (Foto: Metsäalan Ammattilehti)

Se os resíduos são recolhidos após a realização das operações de colheita, como uma operação em separado, todos os custos de coleta e remoção devem ser computados para a recuperação da biomassa. Em um estudo em Flagstaff, Arizona, Klepac et al. (2006) encontraram que o custo de coleta de biomassa era onze vezes maior por tonelada do que o custo de extração de produtos sólidos (forwarder), basicamente devido à baixa densidade dos resíduos da exploração. A enfardadora Timberjack 1490 foi especificamente desenvolvida para tratar desse problema densificando os resíduos de exploração no talhão para facilitar a recuperação de uma maneira mais efetiva economicamente.

### 3.1. Colheita de Árvores de Menor Porte

Existem três sistemas principais de colheita nos EUA: árvore inteira, toras longas e toras curtas. De acordo com McCary (1991), o principal sistema utilizado em 1986 era o de árvores inteiras, responsável por 94% de toda a madeira colhida. Mais recentemente, Leinonen (2004) cita que o sistema de árvores inteiras ainda é o principal, com 80% da produção, seguido por toras curtas com 15% e toras longas com 5%.

No método de árvores inteiras, as árvores são cortadas e arrastadas até a margem da estrada para desgalhamento e/ou processamento e estocagem. Na colheita de toras longas, as árvores são cortadas, desgalhadas e destopadas junto ao local de corte, e os troncos são transportados até o carreador ou pátio intermediário. Em ambos os métodos, a toragem se dá no local de estocagem ou pátio da indústria. O sistema de toras curtas (“cut-to-length” - CTL) pressupõe que todo o processamento seja feito no local de corte e as toras sejam transportadas até a margem do carreador onde serão estocadas.

Um problema atual é a situação econômica dos serviços de exploração florestal nos EUA. De acordo com Stuart et al. (2005), os custos de exploração aumentaram 35% no período 1995-2004, mas os preços pagos pelos serviços de colheita reduziram-se em 10%. Existem também diferenças acentuadas de acordo com o sistema de colheita empregado. Hartsough et al. (1997) encontraram que os custos da madeira entregue na fábrica para sistemas de toras curtas eram 25% maiores do que aqueles encontrados para os sistemas de árvores inteiras em florestas plantadas e 50% maiores em povoamentos naturais.

Watson et al. (1986) testaram dois métodos de colheita para a utilização de biomassa de sub-bosque comparando-os com um método de colheita convencional, todos empregando feller-buncher e skidder em um plantio de *Pinus* e um povoamento natural. O método de colheita convencional testado removeu todos os pinheiros com DAP de 15 cm ou mais e as folhosas para serraria como toras longas. Os dois métodos de colheita intensiva são chamados de uma-passagem e duas-passagens. No método de uma-passagem, todo material com DAP de 2,5 cm ou mais era colhido simultaneamente. Árvores de *Pinus* com DAP entre 2,5 e 15,0 cm e folhosas com DAP menor ou igual a 28,0 cm eram transformadas em cavacos para energia e todos os outros troncos eram colhidos na forma de toras longas. Com o método de duas-passadas, a madeira para energia era colhida em uma primeira passada através do talhão e a madeira de tamanho comercial removida como tora longa em uma segunda etapa. O sistema de colheita convencional recuperou em média 52% da biomassa em pé, enquanto que os métodos de uma-passada e de duas-passadas recuperaram em média 85% e 75% da biomassa em pé, respectivamente. O método de uma passada não recuperou tanto quanto possível do total de toras do talhão, porque os ponteiros enviados para cavaqueamento incluíram uma parte maior do tronco para facilitar a alimentação do picador. No sistema de duas-passadas, os custos de corte da madeira para energia eram muito maiores, mas não havia diferenças significativas nos custos de arraste entre os tratamentos na floresta plantada. Isso demonstrou que os custos de arraste não se alteram em função do tamanho do tronco, caso o feller-buncher possa montar pilhas que preencham toda a capacidade de carga do skidder. O sistema convencional teve um custo médio de colheita de \$8.75 por tonelada verde até o



caminhão, enquanto os outros dois métodos, de uma-passada e duas-passadas, apresentaram médias de \$7.60 e \$8.85 por tonelada verde.

Os métodos de uma e duas-passadas também foram avaliados por Miller et al. (1985) em plantações de *Pinus ellottii*, com idades entre 17 e 23 anos, médias de produtividade por hectare de 67,5 toneladas de madeira para energia e 80 toneladas de toras para polpa. O feller-buncher foi a única máquina afetada pela quantidade de madeira para energia presente nos blocos de duas-passadas. Com o decréscimo da quantidade de madeira para energia, a produtividade do feller-buncher também diminuía. O sistema de uma-passada teve custos menores por tonelada e produziu mais madeira para energia do que o sistema de duas-passadas. Mas esse último sistema teve o benefício de permitir a secagem da madeira cortada para energia, aumentando assim o seu valor em BTUs.

Hartsough et al. (1994) estudaram três sistemas de colheita em desbastes de plantios de *Pinus* e talhões regenerados naturalmente, produzindo toras de dimensões menores e cavacos para energia. O sistema de árvores inteiras consistiu de um feller-buncher, um skidder, um processador do tipo “stroke” (Figura 5), carregador e picador. O sistema de toras curtas incluiu um harvester, um forwarder, um carregador e um picador. Um sistema híbrido combinou um feller-buncher e um harvester para produzir feixes de pequenas árvores inteiras e montes de toras desganhadas para serraria. O sistema de toras curtas teve custos maiores por unidade de material e produziu menos combustível do que os outros sistemas, com a vantagem de apresentar menos danos aos povoamentos remanescentes. Mesmo assim, os níveis de danos foram baixos para todos os sistemas.



Figura 5. Cabecote processador PowerStroke (Foto: Treeking)

Um sistema de toras curtas, composto por um harvester e um forwarder, pode ser uma opção a ser usada quando os preços de madeira para energia não cobrirem os custos de cavaqueamento e transporte de resíduos, deixando-os no sítio. Hartsough e Cooper (1999) testaram um sistema CTL, composto de um harvester Bell TH120, um forwarder Bell T12B 12-ton e um picador Morbark 27, em corte raso em uma plantação de *Eucalyptus viminalis* com 7 anos de idade, 1225 árvores por ha, com DAP médio de 14,3 cm e volume sem casca de 0,094 m<sup>3</sup> por árvore. As produtividades são apresentadas na Figura 6 e a conclusão foi de que esse sistema, modulado em três harvesters, dois

forwarders e um picador, poderia ser competitivo em relação a sistemas de árvores inteiras.

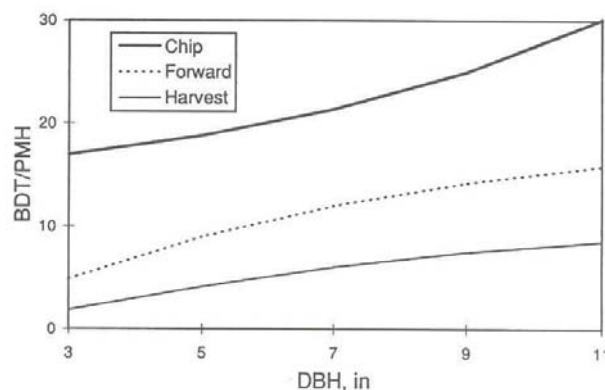


Figure 6. Produtividade (tonelada seca) por hora máquina produtiva (HMP) para um harvester (com descascamento), um forwarder (distância média de 150 m) e um picador (Hartsough and Cooper, 1999)

Klepac et al. (2006) avaliaram um sistema CTL, formado por um harvester Timberjack 1270 e um forwarder Timberjack 1010B de 10 toneladas, para diminuição do risco de incêndio em um talhão com a redução de biomassa combustível. A prescrição envolvia a remoção de 260 árvores por ha com menos de 40 cm de DAP, atingindo um volume de 28 m<sup>3</sup> por ha em um talhão, e a remoção de 1125 árvores por ha com 56% de redução na área basal, um volume retirado de 57 m<sup>3</sup> por ha de outro talhão. O harvester produziu 10,3 m<sup>3</sup>/HMP enquanto colhendo madeira para serraria e 0,93 m<sup>3</sup>/HMP ao colher biomassa. A produtividade do forwarder foi em média de 19,54 m<sup>3</sup>/HMP ao transportar toras para serraria e 4,53 m<sup>3</sup>/HMP transportando biomassa. A conclusão inevitável foi quanto a ineficiência do sistema no manuseio de árvores de pequeno porte para biomassa.

Brunberg e Svenson (1990) consideraram o manuseio simultâneo de múltiplos troncos (“multitree-handling” - MTH) como uma boa alternativa para atingir maiores produtividades com harvesters com um só cabeçote processador (“single-grip”), sem sacrificar as vantagens do manuseio de uma única árvore. Outra linha de desenvolvimento é o uso do múltiplo processamento após o corte e amontoamento mecanizado, mas que vai contra a tendência do uso de módulos com menor número de máquinas e o problema da sensibilidade do feller-buncher às condições do terreno. Em um estudo com um harvester Valmet 892/955, um grande número de árvores foram desbastadas com o uso de MTH, com aumento na produtividade entre 16 e 37%. O harvester pôde trabalhar mais rápido devido a redução na movimentação do cabeçote e o fato de que as árvores podiam ser processadas simultaneamente.

Apos três testes conduzidos no Canadá com o cabeçote multiprocessador Waratah HTH-470HD (Figura 7), montado em trator Timberjack 608L (2 sítios) e um harvester Timberjack 1270B (1 sítio), Gingras (2004) concluiu que a habilidade de manusear mais do que uma árvore por ciclo aumentou a produtividade em média entre 21 a 33% comparado com o manuseio de árvores semelhantes uma por uma. O volume médio do

talhão era de 14 m<sup>3</sup>/ha e a produtividade da máquina foi de 15,5 m<sup>3</sup>/HMP. Contudo, com o aumento do DAP médio, a vantagem oferecida pelo processamento simultâneo de múltiplos troncos diminuiu, sendo nenhuma em DAP ao redor de 20 cm. Ainda assim, não deixa de ser um conceito atrativo para desbastes comerciais e outros tipos de corte parcial.



Figura 7. Cabeçote multi-processador Waratah HTH-470HD (Gingras, 2004).

Um estudo de tempos foi feito por McDonald e Stokes (1994) com um sistema de colheita constituído de três feller-bunchers HydroAx 411B com tesouras de 40 cm, dois skidders de garra Timberjack 450B e um picador Morbark modelo 30 (600 kW). Os equipamentos operaram em um plantio de Sycamore, com 6 anos de idade e árvores com 7,6 cm de DAP, com incremento médio anual de 14,3 toneladas verdes por ha. A produtividade do feller-buncher foi de 15,5 toneladas verdes/HMP, a do skidder foi de 37,5 toneladas verdes/HMP, do picador de 57 toneladas verdes/HMP e o custo final atingiu \$8.71 por tonelada verde. Quando o feller-buncher colocava duas “braçadas” (feixes) por pilha, comparando com 4 “braçadas” (um ciclo do skidder), a sua produtividade era maior, mas esse ganho era mais do que suprimido pela perda da produtividade do skidder.

Com o intuito de suplantar os obstáculos na forma de árvores com pequeno diâmetro, fabricantes e projetistas de equipamentos estão desenvolvendo novos tipos de colhedoras semelhantes a ceifadoras agrícolas. Essas máquinas cortam tudo em seu caminho em uma única passada. Não importa se as árvores sejam pequenas e numerosas ou grandes e esparsas – a operação de corte segue em frente ao longo do talhão. As formas mais avançadas desses projetos destinam-se à colheita de talhões uniformes de plantios arbóreos de curta rotação, sendo um dos exemplos a colhedora Claas Jaguar (Figura 8), que realiza as funções de corte e picagem. Estudos realizados em colheita simultânea de duas linhas de árvores, em talhões com média de 19,2 toneladas secas por ha, registraram produtividade média de 8,6 toneladas secas por hora (Hartsough e Yomogida, 1996).



Figura 8. Colhedora “cut-and-chip” Claas Jaguar

### 3.2. Colheita de Resíduos Florestais

No caso da colheita de resíduos da exploração florestal, é muito importante conhecer as propriedades desses resíduos. De acordo com Hakkila (1998), galhos, comparados unicamente com troncos de *Pinus sylvestris* e spruce (*Picea abies*), têm as seguintes características: a) elevado conteúdo de casca; b) a proporção de lignina é alta e a de celulose baixa, e também tem mais terpenos, taninos, resinas, ceras e substâncias gordurosas, aumentando assim o poder calorífico quando comparado com a madeira do tronco; c) maior conteúdo de cinzas, especialmente em acículas, o que diminui o poder calorífico e pode causar gastos extras de manuseio; d) maior densidade, que significa que o valor calórico é maior do que na madeira do tronco; e) menor conteúdo de umidade.

Alakangas et al. (1999, apud Kallio and Leinonen, 2005) descreveram as vantagens e desvantagens da colheita de resíduos da exploração, em termos de aspectos silviculturais. As vantagens são: a) diminui a lixiviação de nutrientes para os cursos d’água; b) a preparação do solo pode ser feita com métodos menos agressivos; c) melhora o desenvolvimento natural de plantas em áreas de regeneração; d) com a possibilidade do plantio ser antecipado, as áreas em regeneração não são cobertas por ervas daninhas e haverá uma menor necessidade do seu controle; e) o plantio é mais fácil; e f) o custo da regeneração florestal é mais baixo, ela é mais rápida e melhor. Quanto às desvantagens: a) matéria orgânica é removida do ciclo de nutrientes; b) diminui a quantidade de húmus protegendo o solo; c) alguns nutrientes são removidos do ecossistema; d) aumenta o risco de acidificação; e e) o perigo de redução no crescimento da floresta.

Para reduzir o impacto da utilização dos resíduos da colheita nas florestas da Suécia, em termos da exportação de nutrientes, são colhidos, em média, cerca de 70% dos galhos e 30% das acículas (Börjesson, 2000).

Outra característica importante da madeira para energia é o seu conteúdo de umidade, considerando-se um máximo permissível para o seu uso como combustível na faixa de 65 a 68%. Acima dessa faixa, a energia requerida para evaporar a umidade é maior do que a

energia contida na matéria seca da madeira e a combustão não se mantém sem um suprimento externo de energia. A vaporização consome 0,7 kWh de energia calorífica por kg de água. Se o conteúdo de umidade de uma conífera recém-cortada for reduzido de 55% para 40%, a quantidade inicial de água reduz-se pela metade e o poder calorífico efetivo aumenta em 8% (Hakkila, 2004). Em qualquer sistema, conteúdo excessivo de umidade no combustível pode causar corrosão e entupimentos nos sistemas de alimentação e manuseio de combustível, com conseqüente redução na eficiência de combustão. A madeira contém ácidos, que com umidade suficiente podem ser bem corrosivos (Badger, 2002).

Quanto à colheita dos resíduos dentro do talhão, uma opção técnica com boas perspectivas foi desenvolvida na Escandinávia, com base nos sistemas de colheita de toras curtas, onde uma enfardadora de biomassa florestal coleta, comprime e amarra resíduos florestais em fardos cilíndricos com aproximadamente 60 cm de diâmetro e 3 m de comprimento. O manuseio dessa biomassa torna-se bastante simplificado ao compactar e agregar resíduos em forma semelhante a toretes (Figura 9).



Figura 9. Enfardadora florestal modelo Timberjack 1490D

Com uso já intenso na Escandinávia, esse tipo de equipamento vem sendo introduzido de maneira experimental nos Estados Unidos. Um dos estudos foi desenvolvido por Rummer (2004) em seis diferentes regiões florestais na região Oeste daquele país (Tabela 2). Em aplicações na Europa, o comprimento padrão dos fardos é de 3 m. Nesse estudo, os comprimentos variaram entre 2,4 e 4,8 m, procurando adaptar os fardos aos trailers tradicionais de transporte de madeira. Os fardos menores eram transportados de maneira transversal ao eixo da carreta, enquanto que se esperava que os maiores se adaptassem em reboques padrões com fueiros duplos (Figura 10). Os fardos com material verde tinham uma densidade similar à densidade seca das toras (ao redor de  $360 \text{ kg m}^{-3}$ ), enquanto que os fardos formados por material seco apresentavam uma densidade menor ( $265 \text{ kg m}^{-3}$  em média), evidenciando o problema de se conseguir atingir a capacidade legal de carga dos reboques convencionais, principalmente no caso de se trabalhar com resíduos secos.

Tabela 2. Características dos locais do estudo

Local	Tipo de Floresta	Tipo de Resíduo	Quantidade combustível (t secas/ha)	
			Pré	Em fardos
Bonner's Ferry, ID	Coníferas	Resíduo 4 anos	54,2	8,8
Idaho City, ID	Pinus ponderosa	Árvores inteiras	97,0	51,0
Stevensville, MT	Pinus ponderosa	Resíduos de toras curtas	27,0	1,5
Medford, OR	Coníferas	Galhos grossos, topos	64,8	21,2
Bend, OR (1)	P. lodgepole	Pequenas árvores inteiras	90,5	18,2
Bend, OR (2)	P. lodgepole	Pequenas árvores inteiras	60,0	37,0



Figura 10. Reboque para toras curtas com 4 fueiros

Outro problema referiu-se à solidez dos fardos, que eram mantidos rígidos quando produzidos de resíduos com algumas peças com 3 a 6 m de comprimento e, ao menos, 8 cm de diâmetro. Sem esse material mais longo no feixe, alguns fardos tornavam-se flexíveis ou mesmo quebravam-se (Figura 11). Materiais mais curtos e mais largos, como pedaços de tocos, também não enfardavam de maneira adequada. Peças com diâmetros maiores introduzem uma certa descontinuidade no fardo, que podem produzir pontos mais fracos. A máquina pode se ajustar a materiais mais difíceis aumentando o número de amarras e reduzindo o espaço entre elas, mas isto afetaria a produtividade e o custo da operação.



Figura 11. Fardo descartado devido à quebra

As especificações técnicas para o 1490D indicam uma produtividade entre 10-30 fardos por hora. Nesse estudo foram registradas produtividades entre 5 e 24 fardos por hora, com a menor produção causada pelo arranjo mais disperso do resíduo, o que aumentou o tempo de alinhamento, coleta e alimentação do material. O arranjo do resíduo era crítico no manuseio de árvores inteiras, com o operador tendo que alinhar as peças de maior comprimento, atividade que poderia ser facilitada se feita na operação anterior de colheita de madeira.

Assumindo um rendimento operacional de 20 fardos por hora.máquina (8 toneladas secas), o custo de coleta de biomassa e formação dos fardos seria de US\$ 16.00 por tonelada seca. O custo da extração com forwarder foi estimado em US\$ 5.00 por tonelada seca, baseado em quatro cargas por hora produtiva. Com um custo de transporte entre US\$ 0.06 a US\$ 0.12/t-km, uma viagem de 80 km iria acrescentar mais US\$ 5.00 a US\$ 10.00 por tonelada seca. A produção de cavacos na fábrica estaria por volta de US\$ 3.00 por tonelada seca, o que resultaria no custo final entre US\$ 29.00 e US\$ 34.00 por tonelada seca, com aproximadamente metade do custo total correspondendo à operação de enfardamento. Esse valor não é competitivo atualmente quando comparado com outros preços de combustíveis, como carvão, ao redor de US\$ 24.74 por tonelada entregue na fábrica. Contudo, poderá se tornar, caso a operação de enfardamento elimine ou reduza o custo de outras operações, como empilhamento e queima, trituração do material para facilitar o preparo do solo etc.

Enfim, trata-se de um sistema de coleta de resíduos que apresenta potencial para o seu desenvolvimento e futura adequação a algumas situações de mercado ávido por fornecimento de energia, ou mesmo a substituição de outras operações de manejo florestal.

#### 4. CONCLUSÕES

A biomassa florestal coletada como parte integrante das operações de colheita florestal será a matéria prima de custo mais acessível para a produção de energia. Esse material

pode ser obtido pelo custo da produção e transporte de cavacos unicamente. A remoção adicional de material de sub-bosque ou árvores selecionadas, como parte da operação de colheita, é a próxima fonte economicamente viável de biomassa para energia. Esse volume irá agregar os custos de corte e extração, mas essas atividades podem ser desempenhadas de maneira mais eficiente como parte de uma operação maior de colheita. A coleta de resíduos da colheita como uma operação em separado é geralmente de alto custo, embora tecnologia tenha sido desenvolvida para redução de custos pela densificação da biomassa.

Colher biomassa florestal especificamente para produção de energia também é caro. O pequeno diâmetro e baixo volume das árvores para energia estimula o desenvolvimento de equipamentos de colheita semelhantes a ceifadoras agrícolas adaptadas para sítios florestais. A produtividade é limitada pelo volume colhido por área e os custos são elevados por se tratar de equipamentos especializados.

Definir a disponibilidade potencial de biomassa arbórea como matéria prima para produção de energia requer boa informação sobre custos operacionais e produtividade de sistemas de colheita de biomassa. O componente de maior potencial de fornecimento de biomassa florestal nos EUA (desbaste de madeira para energia) será caro, tendo em vista que o total de custos operacionais deverá ser coberto pelo valor da biomassa como combustível. Contudo, resíduos de colheita podem ser obtidos por um pouco mais do que os custos de picagem e transporte, desde que esses resíduos sejam obtidos em operações integradas de colheita florestal.

## 5. REFERÊNCIAS

Alig, R., et al. 2003. Land Use Changes Involving Forestry in the United States: 1952 to 1997, With Projections to 2050. General Technical PNW-GTR-587, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Corvallis, OR, September.

Badger, P.C. 2002. Processing cost analysis for biomass feedstock. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. ORNL/TM-2002/199, 53 p. Disponível em: <http://bioenergy.ornl.gov/main.aspx>

Börjesson, P. 2000. Economic valuation of the environmental impact of logging residue recovery and nutrient compensation. *Biomass and Bioenergy*, 19 (3) :137-152.

Brunberg, B.; Svenson, G. 1990. Multitree-handling can reduce first-thinning costs. In: *Harvesting small trees and forest residues, 1990*, Copenhagen. Proceedings. Auburn: USDA Forest Service. P. 8-20.

EIA - Energy Information Administration. 2005. Historical Renewable Energy Consumption by Energy Use Sector and Energy Source. Report Released: August 2005. Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.renewables/page/trends/table5b.html>

EIA – Energy Information Administration. 2006. Assumptions to the annual energy outlook 2006. Report #:DOE/EIA-0554. Distribuído: March 2006. Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/assumption/index.html>



- Gingras, J.F. 2004. Early Studies of Multi-Tree Handling in Eastern Canada. *International Journal of Forest Engineering*, Vol. 15 No. 2, p. 18-22.
- Hakkila, P. 1998. Possibilities of forest residue as an energy source. *Puuenergia* 3/1998. p. 8-9.
- Hakkila, P. 2004. Developing technology for large-scale production of forest chips. Helsinki. Tekes. Technology Programme Report 6/2004. 99 p.
- Hartsough, B. R.; McNeel, J. F.; Durston, T. A.; Stokes, B. J. 1994. Comparison of mechanized systems for thinning ponderosa pine and mixed conifer stands. In: 1994 international winter meeting sponsored by the American Society of Agricultural Engineers. ASAE Paper 94-7513. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers. 20 p.
- Hartsough, B.; Yomogida, D. Compilation of state-of-the-art: mechanization technologies for short-rotation woody crop production. November 6, 1996. Biological and Agricultural Engineering Department, University of California, Davis. 66 p. 1996.
- Hartsough, B. R.; Drews, E.S.; McNeel, J. F.; Durston, T. A.; Stokes, B. J. 1997. Comparison of mechanized systems for thinning ponderosa pine and mixed conifer stands. *Forest Products Journal*. Vol. 47, No. 11/12, p.: 59-64.
- Hartsough, B. R.; Cooper, D.J. 1999. Cut-to-length harvesting of short-rotation eucalyptus. *Forest Products Journal*. Vol. 49, No. 10, p.: 69-75.
- Kallio, M.; Leinonen, A. 2005. Production technology of forest chips in Finland. VTT . PRO2/P2032/5. 97 p.
- Kirby, M.; Dahle, D.; Heimiller, D.; Owens, B. 2003. Assessing the potential for renewable energy on public lands. U.S. Department of the Interior and U.S. Department of Energy. DOE/GO-102003-1704, 27 p.
- Klepac, J; Rummer, B.; Thompson, J. 2006. Evaluation of a cut-to-length system implementing fuel reduction treatments on the Coconino National Forest in Arizona. In: Proceedings of the 29<sup>th</sup> Council of Forest Engineering Meeting. Corvallis, OR. Pp. 405-414.
- Leinonen, A. 2004. Harvesting technology of forest residues for fuel in the USA and Finland. Espoo 2004. VTT Tiedotteita . Research Notes 2229. 132 p.
- McCary, J. 1991. Steady pace. *Timber Harvesting*, Montgomery, AL. March: 12-4.
- McDonald, T.P; Stokes, B.J. 1994. Harvesting costs and utilization of hardwood plantations. Proceedings of the International Energy Agency Task IX, Activity 1 Symposium "Mechanization in short Rotation, Intensive culture Forestry"; 1994 March 1-3; Mobile, AL. Auburn, AL: US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. P. 5-13.
- Miller, D.E.; Watson, W.F.; Straka, T.J. [and others]. 1985. Productivity and cost of conventional understory biomass harvesting systems. ASAE Paper No. 85-1598. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers. 19 p.

- Perlack, R.D.; Wright, L.L.; Turhollow, A.F.; Graham, R.L.; Stokes, B.J.; Erbach, D.C. 2005. Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply. ORNL/TM-2005/66, Oak Ridge, TN. 59 p. 20.
- Rummer, B. 2004. Forest residues bundling project: New technology for residue removal. US Forest Service, Missoula Technology Development Center. 20 p.
- Smith, W. B., et al. 2004. Forest Resources of the United States, 2002. Gen. Tech. Rep. NC-241. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station, St. Paul, Minn., April.
- Stokes, B. J. 1992. "Harvesting Small Trees and Forest Residues." Biomass and Bioenergy 2(1):131-147.
- Stuart, W.B.; Grace, L.A.; Altizer, C.B. 2005. Preliminary 2004 Logging Cost Indices. November 2005. 15 p. Disponível em: <http://fwrc.msstate.edu/pubs/WSRI-R7.pdf>. Acessado em: 06/19/07.
- Timber Mart-South. 2007. Timber Mart-South Market News Quarterly. 1<sup>st</sup> Quarter 2007, Vol. 12, No. 1. 32 p. Disponível em: [http://www.tmart-south.com/tmart/pdf/Qtr\\_01Q07news.pdf](http://www.tmart-south.com/tmart/pdf/Qtr_01Q07news.pdf)
- USDA-FS (U.S. Department of Agriculture - Forest Service). 2004. "Fuel Treatment Evaluator," <http://ncrs.fs.fed.us/4801/hot-topics/bio-fuel-reduction/FTEbrief.pdf>.
- Vesterby, M., and L. Krupa. 2001. Major Uses of Land in the United States, 1997. Statistical Bulletin No. 973. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, September.
- Watson, W.F.; Stokes, B.J.; Savelle, I.W. 1986. Comparisons of two methods of harvesting biomass for energy. Forest Products Journal. 36(4): 63-68.
- Watson, W.F.; Miller, D.E.; Stokes, B.J.; Broussard, M.L. 1987. Energy budget for an energy wood harvesting system. In: Proceedings of the 1986 southern forest biomass workshop. Muscle Shoals, AL: Tennessee Valley Authority: 103-116.
- Wegner, T.H. USDA Forest Service Biorefinery/Bioenergy R&D Program. 2006. Apresentação em Powerpoint acessada em 03/07/2007 e disponível em: [http://www.wisys.org/uploads/media/Theodore\\_Wegner.pdf](http://www.wisys.org/uploads/media/Theodore_Wegner.pdf)
- Westbrook, M.; Greene, W.D.; Izlar, R. 2006. Harvesting forest biomass by adding a small chipper to a ground-based tree-length southern pine operation. In: Proceedings of the 2006 Council on Forest Engineering Meeting. Corvallis, OR. 10 p.