



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Departamento de Ciências Florestais

LCF0683 – Colheita e Transporte de Madeira

**PRODUÇÃO DE BIOMASSA RESIDUAL FLORESTAL DE TOCOS E RAÍZES EM
OPERAÇÕES MECANIZADAS**

Professor: Fernando Seixas

Cecilia Pereira Theodoro Chotti N° USP 11856152

Douglas Ribeiro Valentim N°USP 977056547

Rafael Hasunuma Tunes N° USP 11785661

Piracicaba

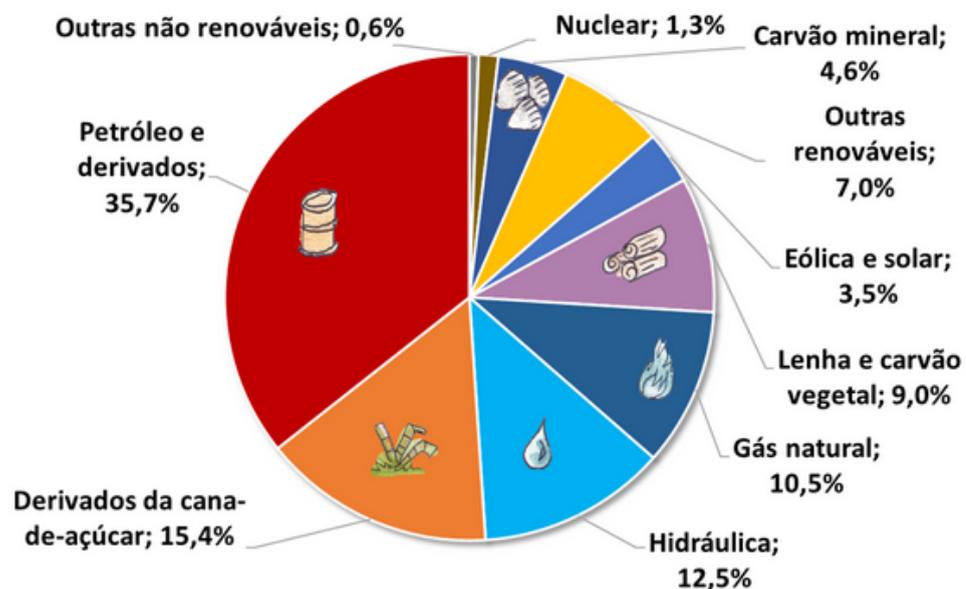
2023

INTRODUÇÃO

A biomassa florestal, proveniente primordialmente de tocos e raízes de eucalipto e pinus na forma de cavacos, representa uma promissora fonte energética no contexto energético e econômico do Brasil. Sua viabilidade como combustível para geração de energia termelétrica foi confirmada por análises preliminares em pequena escala. No entanto, para efetivamente tornar essa fonte viável e econômica, é essencial aprimorar toda a cadeia de produção, desde a extração no solo até a entrega ao consumidor final. Além disso, a caracterização das propriedades dos tocos e raízes de eucalipto e pinus desempenha um papel fundamental no planejamento logístico das rotas.

A crescente necessidade de aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira, impulsionada pela busca por segurança e robustez no Sistema Interligado Nacional, tem incentivado a pesquisa e o aprimoramento dessa alternativa de biomassa residual florestal. A Figura 1 ilustra a matriz energética brasileira, com uma destacada presença dos combustíveis fósseis, que abarcam aproximadamente metade dela. Isso enfatiza a oportunidade de expansão da biomassa, que poderia ocupar uma parcela considerável desse cenário.

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira em 2022.



Fonte: EPE, 2022.

Segundo Innocente (2011), várias rotas tecnológicas estão disponíveis para a utilização energética da biomassa, todas envolvendo a transformação da biomassa por meio

de processos termoquímicos (combustão, gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou processos físico-químicos (digestão anaeróbia e fermentação) em um produto intermediário destinado à geração de energia.

No entanto, a combustão direta, considerada ineficiente por muitos autores, apresenta problemas relacionados à alta umidade e baixa densidade energética do combustível, tornando seu armazenamento e transporte desafiadores. Em contrapartida, a utilização da biomassa como combustível oferece vantagens ambientais e socioeconômicas, uma vez que é uma fonte renovável e de baixa emissão de dióxido de carbono. Além disso, a cinza resultante dos processos termoquímicos da biomassa é menos prejudicial ao ambiente e menos corrosiva para os equipamentos.

Para avaliar a utilidade da biomassa de tocos e raízes, é essencial considerar fatores como teor de umidade, densidade aparente e densidade energética. A umidade afeta diretamente a qualidade do material e, portanto, influencia a logística de produção.

A cadeia produtiva de tocos e raízes de eucalipto e pinus para geração de energia requer várias etapas, desde o arranquio no solo até o transporte para as unidades de geração. É fundamental compreender o comportamento da umidade dos tocos e raízes para otimizar o planejamento logístico.

O poder calorífico útil (PCU) é outro parâmetro relevante na tomada de decisões operacionais, como o momento ideal para o cavaqueamento e transporte dos cavacos para as unidades de conversão. Até o momento, no Brasil, foram realizadas poucas medições das propriedades físico-químicas dessa biomassa em condições operacionais.

A determinação das curvas de secagem da madeira, quando armazenada como tocos e raízes ou cavacos, é essencial para reduzir os custos das operações, determinar a quantidade de biomassa necessária para atender à demanda da unidade de conversão, adaptar equipamentos e rotas logísticas e otimizar soluções logísticas para o aproveitamento dos cavacos de madeira.

Independentemente da tecnologia adotada, a biomassa deve ser transformada em um produto intermediário, como cavacos, para ser usada na geração de energia.

PROCESSO

Dentro das rotas de aproveitamento da biomassa residual de tocos e raízes, o arranquio é a operação mais importante sob todos os pontos de vistas, quer sejam ambientais ou econômicos ou até mesmo de ordem operacional, pois desencadeará uma série de consequências danosas ao meio ambiente, causar transtorno para as operações seguintes, inclusive pelo excesso de contaminação do solo, dificultar as operações subsequentes para o replantio da área com novas florestas, custos incompatíveis com o processo, etc. Em outras palavras, o arranquio dos tocos e raízes é uma operação sensível e onerosa, demandando

muita atenção dos gestores na seleção dos equipamentos a serem utilizados, pois poderão resultar em custos ou consequências que inviabilizam o uso dessa fonte de biomassa.

Atualmente o arranquio dos tocos é realizado com escavadoras equipadas com implementos destocadores, tais como as conchas, unhas e pinças hidráulicas, que causam, em maior ou menor grau, distúrbios ou movimentação excessiva do solo. Além destas, utilizadas somente para arrancar tocos e raízes, há uma outra categoria de pinças que os arrancam e cortam, reduzindo volume e a contaminação excessiva pelo solo.

Faz-se necessário o desenvolvimento de equipamentos que atendam às necessidades operacionais causando o mínimo possível de distúrbios ou movimentação excessiva do solo.

As serras-copo acopladas em tratores agrícolas ou escavadoras são uma boa opção quando se trata de causar pouco distúrbio ao solo, pois sua ação é bem pontual, e normalmente, fica apenas um pequeno buraco no solo, do tamanho do seu diâmetro, de 35 cm. Mas há serras-copo de diferentes diâmetros, a serem selecionadas de acordo com o diâmetro dos tocos e raízes a serem arrancados. A qualidade da biomassa produzida é muito boa, pois aproveita-se apenas os tocos e as coroas das raízes, que têm maiores peso, densidade básica e poder calorífico que o restante das raízes grossas e finas e são pouco contaminadas pelo solo.

Os pequenos buracos e o remanescente de raízes não atrapalham as operações subsequentes do processo, nem mesmo as operações silviculturais por ocasião do replantio das áreas. A desvantagem do uso da serra-copo é o seu baixo rendimento operacional, mas tem a vantagem de ser um investimento relativamente reduzido, pois seu custo é baixo e os tratores agrícolas e as escavadoras utilizados são de baixa potência quando comparado com os outros implementos. Há uma boa oportunidade para melhorias desta operação, principalmente na adoção de tecnologias que localizem os tocos e direcionem os movimentos em sua direção automaticamente, reduzindo tempo e otimizando a sua produtividade.

De fato, sabe-se que ainda há muito a ser melhorado e que as máquinas precisam ser especialmente desenhadas para esse tipo de operação. Também é certo que arrancando um a um não se atinge rendimentos operacionais satisfatórios. Alguns trabalhos indicam que é possível arrancar de maneira contínua e movimentando o mínimo de solo, apenas no alinhamento dos tocos, podendo utilizar posteriormente o antigo alinhamento para o plantio das mudas da nova plantação. Essa eliminação, feita por meio do corte das raízes laterais e das pivotantes a determinada profundidade, deixa o toco à flor do solo facilitando sua retirada do local.

Atualmente existem vários modelos de destocadores contínuos no mercado, a grande maioria aplicados na erradicação de pomares. Especificamente para arrancar tocos e raízes de eucaliptos e pinus de forma contínua, em linha, disponível no mercado, há um modelo de destocador de arrasto, com rodas dentadas como ferramenta para o arranquio, que funciona muito bem para arrancar tocos de pinus mas pouco testado e, portanto, não comprovadamente eficiente para o arranquio de tocos de eucaliptos. Este modelo, por ser importado, tem um valor de aquisição muito alto, o que o torna pouco acessível para o mercado brasileiro.

Uma desvantagem deste equipamento é que ele não trabalha sobre a serrapilheira e resíduos de colheita e, por isso, necessita de limpeza prévia do terreno, demandando uma operação a mais, e, portanto, mais tempo de operação e custos. Mesmo trabalhando em área limpa, pelo fato de arrancar o toco com praticamente todas as raízes, ficando no solo apenas aquelas que se arrebentam, ocorre o embuchamento de forma muito frequente, exigindo manobras de marcha-ré para desembuchar o equipamento, reduzindo sua produtividade.

A segunda opção seria um modelo de subsolador-destocador que, embora muito bem testado e comprovado, ainda não está disponível no mercado. O seu desenvolvimento chegou à cabeça de série mas, ainda não entrou em linha de produção em escala comercial. Foi desenvolvido para o arranquio de tocos de eucaliptos e de pinus ou de quaisquer outras espécies florestais plantadas que, ao mesmo tempo, subsola a área e a deixa pronta para receber um novo plantio, logo após a remoção dos referidos tocos para fora do talhão.

Esta condição é uma das vantagens deste implemento, uma vez que elimina uma operação, a subsolagem, de custo considerado alto, reduz o intervalo entre a destoca e o replantio da área, bastando uma adubação na linha de plantio, rápida e barata, utilizando-se um trator de baixa potência para, na sequência, plantar.

Este equipamento retira o toco, a coroa da raiz e as partes mais grossas das raízes, deixando as mais finas e as radículas permanecerem no solo. Isto é muito interessante pelo lado da sustentabilidade e do balanço de carbono no solo.

Pelas características da operação, os tocos e as raízes ficam mais limpos e, se comparados a outros métodos de destoca, o nível de contaminação é bem menor.

Um detalhe muito importante a ser considerado e evidenciado é que o equipamento consegue trabalhar em áreas com a presença dos resíduos das colheitas, como pontas e galhos, sem necessidade de limpeza prévia para atingir seu objetivo, que é o arranquio dos tocos. Seus dois discos recortados e com aletas laterais, dispostos à frente das duas hastes, se encarregam de cortar todo o material existente, evitando o embuchamento e eliminando a necessidade de manobras de marcha-ré para desembuchar, ganhando um tempo importante para sua produtividade.

Em relação ao arranquio dos tocos e raízes, uma boa opção é a possibilidade de arrancar a árvore inteira, com um cabeçote sacador de árvores. Isto é possível, desejável e recomendado quando se sabe, de antemão, que a plantação a ser colhida será, no todo ou em parte, destocada. Basta substituir o cabeçote de corte por um cabeçote sacador acoplado na escavadora. Neste caso, serão arrastadas as árvores inteiras para as margens das estradas e tocos separados durante o traçamento com garra- traçadora ou cabeçote processador. Quando se encerrar o arraste das árvores o talhão estará totalmente livre de tocos e raízes grossas e liberados para as operações silviculturais subsequentes, reduzindo o intervalo de tempo entre a colheita e o replantio da área, além de economizar operações de destoca e baldeio de tocos. Nas margens das estradas os tocos e raízes ficarão disponibilizados ao longo das bordas dos talhões, juntamente com a ponta fina das árvores, que poderão ser cavaqueadas simultaneamente, aumentando a quantidade de resíduos para serem queimados.

Outra tarefa que pode parecer fácil ou corriqueira é a retirada dos tocos e raízes para fora do talhão, onde serão cavaqueados ou carregados e levados para algum pátio de estocagem ou de processamento, dependendo do fim a que se destina a biomassa. Pode-se agrupá-los para facilitar o baldeio ou transbordo ou mesmo para cavaqueá-los no interior do talhão. Há várias opções de equipamentos para executar esta tarefa de agrupamento. Pode-se orientar um amontoamento em pequena escala durante o arranquio, desde que executados por escavadora com pinças, direcionando vários tocos para o mesmo local. Posteriormente, basta carregá-los nos equipamentos de baldeio ou transbordo com guas ou pás apropriadas. Caso os tocos e raízes não sejam amontoados durante o arranquio, devem ser agrupados posteriormente e, neste caso, pode-se fazer isto de três formas:

- Escavadoras com guas amontoando os tocos;
- Trator sobre esteiras ou pá-carregadoras com ancinho, enleirando ou amontoando os tocos;
- Enleirando os tocos com ancinhos rotativos.

O uso do ancinho para o enleiramento melhora esta limpeza, uma vez que os tocos e raízes, e mesmo a serapilheira e as pontas e galhos são revolvidos várias vezes até que se formem as leiras. Isto ajuda a bater e soltar o solo das raízes e separa as folhas e pequenos galhos, incorporando-os nos 7 a 10 cm superficiais do terreno, melhorando a sua qualidade pela incorporação da matéria orgânica.

Com este sistema de enleiramento, melhora o nível de aproveitamento da biomassa residual, pois agrega as pontas e galhos aos tocos e raízes.

PRODUTIVIDADE

A remoção de terra e areia é realizada simultaneamente à classificação dos cavacos através de peneiras antes do transporte. Existem diversos tipos de peneiras, como as rotativas e vibratórias, embora as últimas sejam menos utilizadas. A escolha do equipamento para a limpeza e classificação dos cavacos de tocos e raízes deve seguir critérios semelhantes aos dos picadores, visando atender às especificações do consumidor final.

A etapa final do processo produtivo é o transporte dos cavacos, idealmente realizado diretamente da esteira de saída da peneira rotativa para as carrocerias dos caminhões. Existem várias configurações de carretas desenvolvidas para esse fim, com diferentes características, como pisos fixos ou móveis e tampas laterais ou traseiras. A estratégia preferencial para otimizar os custos de frete consiste em equilibrar o peso e o volume da carga. É vantajoso estocar os tocos e raízes no campo por um período adequado para reduzir a umidade a menos de 35%, o teor máximo que evita perdas significativas de energia durante a combustão na caldeira da UTE. Essa estocagem também contribui para reduzir a contaminação da biomassa devido às chuvas e à movimentação do material durante o processamento, já que o solo se torna menos aderente quando está mais seco.

O transporte de cavacos tem uma capacidade de carga 78% maior em peso de biomassa do que o transporte de tocos e raízes, o que impacta significativamente a logística e os custos de transporte. Isso reforça a preferência por produzir cavacos diretamente no campo, em vez de no pátio das UTEs.

As rotas de produção de cavacos a partir de tocos e raízes de eucaliptos e pinus, bem como de outras espécies florestais, podem variar de acordo com as condições específicas de cada caso. No entanto, as operações seguem uma sequência padrão, com a seleção dos equipamentos ajustada conforme a demanda e a viabilidade dos investimentos. O objetivo principal é alcançar o menor custo por tonelada de biomassa entregue nas UTEs ou ao cliente final.

Há margem para melhorias nos processos por meio do desenvolvimento de novos equipamentos ou adaptações dos produtos existentes. Isso requer ousadia, inovação e investimentos em P&D para novos produtos e abordagens na composição das rotas de produção. Uma reflexão importante diz respeito à possibilidade de utilizar implementos eficientes e de baixo custo, acessíveis a pequenos produtores, fazendeiros florestais e prestadores de serviços especializados. Os destocadores rotativos, adaptáveis a tratores, escavadeiras e retroescavadeiras com sistemas hidráulicos, são um exemplo nesse sentido. Eles oferecem benefícios em relação à destoca convencional, pois não prejudicam o solo e trituram completamente os tocos, evitando perturbações significativas no solo e preservando a biomassa residual.

É essencial encontrar abordagens práticas e econômicas para aproveitar a biomassa residual, que possui custos muito inferiores em comparação a outros métodos. Uma possível solução poderia envolver o uso de aspiradores de resíduos sólidos montados em tanques, acoplados a caminhões ou carretas tracionadas por tratores agrícolas. No entanto, essa implementação requer dedicação, tempo e recursos financeiros para adequações.

A otimização de cada fase desse processo é de extrema importância para assegurar a eficiência e a viabilidade econômica da produção de cavacos a partir de tocos e raízes de eucalipto e pinus. No que concerne aos equipamentos empregados, estes variam de acordo com as etapas do procedimento, abrangendo tratores e máquinas de arranquio, enleiramento e transbordo, picadores e desfibradores para o processo de cavaqueamento, bem como sistemas de transporte e armazenamento de cavacos.

O estado atual dessa área encontra-se em constante evolução, com pesquisas em curso e desenvolvimentos contínuos que visam aprimorar a eficiência, reduzir os custos e minimizar o impacto ambiental das operações relacionadas à produção de cavacos a partir da biomassa florestal residual.

A questão da nutrição do solo também assume relevância significativa, uma vez que a prática de manter os resíduos na área de plantio tem como principal objetivo a ciclagem de nutrientes. Entretanto, é importante ressaltar que a maior concentração de nutrientes na árvore se encontra principalmente na casca e nas folhas. O lenho corresponde a aproximadamente 12% e as raízes a 17% do total, o que implica que, mesmo com sua extração, ainda

permaneceriam 71% dos nutrientes no solo. Por outro lado, a biomassa presente no lenho representa cerca de 58% do total, com 14% nas raízes, o que assume considerável relevância em uma escala industrial. (VIEIRA, 2021).

ETAPAS DE PRODUÇÃO DE CAVACOS

1. Arranquio e Preparação Inicial: Este estágio compreende a extração dos tocos e raízes do solo, bem como sua preparação preliminar para as fases subsequentes de processamento.
2. Enleiramento: Realizado mediante o uso de um ancinho acoplado a uma pá carregadeira, essa etapa envolve a organização dos tocos em várias linhas convergindo para uma única pilha, simplificando a operação de transbordo até a área de picagem.
3. Transbordo: Conduzido por um trator agrícola equipado com um dispositivo de transbordo especialmente adaptado para acomodar os tocos, este procedimento visa transferir eficientemente os tocos para a área de picagem, situada na margem do talhão. Essa ação aglutina todos os tocos previamente enleirados em uma única pilha pronta para a picagem.
4. Cavaqueamento: Os fragmentos de madeira são então processados em cavacos por meio de equipamentos especializados, tais como picadores ou desfibradores. Os cavacos resultantes representam a forma mais apropriada para a utilização como combustível em unidades termelétricas.
5. Armazenamento e Logística: Os cavacos produzidos são armazenados e transportados para as unidades de geração de energia, envolvendo considerações logísticas cruciais, como o controle da umidade e a avaliação da densidade dos cavacos.
6. Geração de Energia: Por fim, os cavacos são submetidos à queima direta ou a processos de gaseificação ou pirólise, com o propósito de gerar energia térmica ou elétrica. Esta fase final representa o ápice do processo, onde a energia é efetivamente produzida a partir dos cavacos.

OUTRAS ROTAS DE PRODUÇÃO

A pirólise também é uma rota alternativa para a biomassa florestal residual, tendo como produtos principais o bio-óleo, o carvão vegetal e o extrato ácido, enquanto os dois primeiros são utilizados para geração de energia, o terceiro pode ser utilizado na fabricação de produtos como herbicidas, inseticidas, repelentes e redutores de pH. Além disso, parte dos gases gerados nos processos podem ser queimados, elevando o aproveitamento final da biomassa.

A carbonização é outra via de produção de carvão vegetal, utilizada por pequenos e médios produtores voltada principalmente para o abastecimento de siderúrgicas, mas também para o mercado de carvão para churrasco. Algumas siderúrgicas também possuem plantios e carvoarias próprios para auto abastecimento.

As principais vantagens da utilização do carvão em relação à lenha se dá pelo maior teor de carbono (maior capacidade calorífica), possibilidade de atingir maiores temperaturas durante a queima e menor peso no transporte.

Outro processo possível é a gaseificação. Semelhante à pirólise, a biomassa é submetida a altas temperaturas e condições controladas, de modo que libera gases com poder calorífico interessante para produção energética (PIGHINELLI *et al.*, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em resumo, a produção de biomassa residual florestal, com foco na extração de tocos e raízes de eucalipto e pinus, constitui uma área de considerável relevância, dada a sua promissora contribuição como fonte de energia renovável. A otimização dos procedimentos de produção, combinada com a utilização de tecnologia, desempenha um papel de destaque na garantia da viabilidade e sustentabilidade dessa fonte energética. Adicionalmente, a pesquisa contínua se mostra essencial para o desenvolvimento da área e promover a adoção da biomassa florestal residual como parte integrante da matriz energética do Brasil.

BIBLIOGRAFIA

BARÉA, Aldair Ricardo *et al.* RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA DE TOCOS E RAÍZES DE FLORESTAS PLANTADAS. Botucatu: Unesp, 2019. 176 p.

PIGHINELLI, Anna Leticia Montenegro Turtelli *et al.* **Processos termoquímicos aplicados à biomassa florestal**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2018. 38 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/189256/1/DOC-29-CNPAE.pdf>. Acesso em: 26 set. 2023.

VIEIRA, Germano Aguiar. **Geração de energia a partir de tocos de floresta de eucalipto**. [S. I.]: Eldorado Brasil, [2021]. 18 slides, color. Disponível em: <https://antigo.mme.gov.br/documents/36104/939212/1.+Germano+Vieira+-+Eldorado+Brasil.pdf/d2efd7ed-fb3e-6c72-4904-3cf73ad5691c>. Acesso em: 26 set. 2023.