



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**DÂMARIS FIGUEIREDO BILLO NOGUEIRA**

**TEMPO DE SECAGEM DE ÁRVORES DE *Eucalyptus dunnii* E AJUSTES DAS  
FACAS DO PICADOR NA QUALIDADE DE CAVACOS PARA FINS ENERGÉTICOS**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2019

**DÂMARIS FIGUEIREDO BILLO NOGUEIRA**

**TEMPO DE SECAGEM DE ÁRVORES DE *Eucalyptus dunnii* E AJUSTES DAS  
FACAS DO PICADOR NA QUALIDADE DE CAVACOS PARA FINS ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.  
Orientador: Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler  
Coorientadores:

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Graziela Baptista Vidaurre  
Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

- B599t Billo, Dâmaris, 1990-  
Tempo de secagem de árvores de *Eucalyptus dunnii* e ajuste das facas do picador na qualidade de cavacos para fins energéticos / Dâmaris Billo. - 2019. 52 f. : il.
- Orientador: Nilton Cesar Fiedler.  
Coorientadores: Graziela Baptista Vidaurre, Eduardo da Silva Lopes.  
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.
1. Biomassa florestal. 2. Biocombustíveis. 3. Caldeiras combustíveis. 4. Processamento da madeira. 5. Qualidade dos produtos. I. Fiedler, Nilton Cesar. II. Vidaurre, Graziela Baptista. III. Lopes, Eduardo da Silva. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 630


---

**TEMPO DE SECAGEM DE ÁRVORES DE *Eucalyptus dunnii* E AJUSTES DAS  
FACAS DO PICADOR NA QUALIDADE DE CAVACOS PARA FINS ENERGÉTICOS**

**Dâmaris Figueiredo Billo Nogueira**

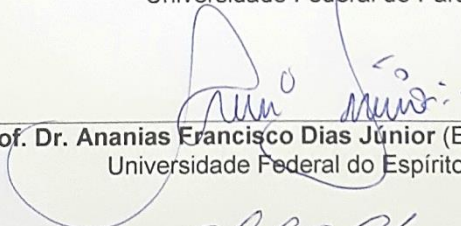
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 22 de fevereiro de 2019.




---

**Prof. Dr. Renato Cesar Gonçalves Robert** (Examinador externo)  
Universidade Federal do Paraná



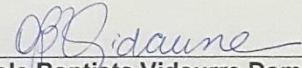
---

**Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior** (Examinador interno)  
Universidade Federal do Espírito Santo



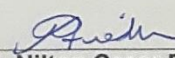
---

**Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes** (Coorientador)  
Universidade Estadual do Centro-Oeste



---

**Profª. Drª. Graziela Baptista Vidaurre Dambroz** (Coorientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

**Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler** (Orientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo

*À minha família, base de tudo que  
construo em minha vida;  
A todos os meus professores por terem  
me moldado até aqui;  
Aos meus maiores incentivadores nesta  
etapa da vida: Ághata Elins, Cayo  
Vinicius Elache Napoli, Érica Cheschim,  
Gabriela Alves, Isadora Batalha e Thais  
Barbosa Cruz;*

*Dedico.*

*A resposta à pergunta “O que é a madeira?” é, evidentemente, esta: “A madeira é a matéria-prima mais versátil e valiosa do mundo!”.*

Egon Glesinger

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, sempre, a Deus – dono de toda ciência e sabedoria.

À minha família pelo esforço em sempre me apoiar e suportar, compreendendo os momentos em que estive ausente e me dando forças para seguir em frente.

À CAPES e à UFES pela formação e apoios técnico-científico e financeiro a mim concedidos, em especial aos professores e colaboradores do DCFM-UFES.

À Cooperativa Castrolanda por ter aberto suas portas e fornecido apoio para o desenvolvimento desta pesquisa; em especial ao Engenheiro Florestal Gilvan, ao Técnico Florestal Fernando, aos colaboradores Odesnei, José e Jorge, e ao pessoal do laboratório de determinação de umidade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Nilton Fiedler e aos meus coorientadores Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Graziela Vidaurre e Prof. Dr. Eduardo Lopes por todo ensinamento, apoio, orientação e conselhos a mim transmitidos.

À UNICENTRO por ter me recebido como aluna especial do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais me possibilitando ampliar conhecimentos e experiência, assim como a secretária do PPGCF Adriane Mores, aos colegas Alysson Braun e Rayssa Braga, e à minha grande amiga Lygia Maria Napoli.

À família Elache Napoli por terem me acolhido e hospedado durante meu período no Paraná, fornecendo apoio pessoal e me auxiliando em momentos que precisei de ajuda na pesquisa. E no mesmo contexto, à Aline Carsil, dona Bernadete, Suellen e Jô.

Aos Profs. Drs. Ananias Júnior e José Tarcísio Oliveira por terem sido prestativos em me atenderem nos momentos em que precisei de orientação extra.

Aos Técnicos José Geraldo e Damielle por terem me auxiliado nas análises em laboratório, parte fundamental desta pesquisa.

Ao Cayo Vinicius por ter se tornado meu grande companheiro de vida e melhor amigo, aquele que me encoraja a seguir meus sonhos e a crescer, me ajudando também nos momentos em que precisei de ajuda para a coleta de dados da pesquisa.

Ao Leandro Berude, meu principal parceiro de mestrado e amigo de vida, por todo apoio, colaboração, suporte, encorajamento e conhecimento compartilhado.

Ao Antônio Henrique, companheiro de laboratório que conheci na reta final do trabalho, peça importante para a conclusão desta pesquisa e, agora, um grande amigo de vida.

Aos demais colegas da UFES – João Gabriel Missia, Glícia Nascimento, Maricélia Moreira, Elbya Gibson, Nay Franzini, Fábio Lacerda, André de Jesus, Letícia Paschoa, Tais Rizzo, Raynord do Haiti, e Francielle, Filha de Fatinha – que estiveram presentes em diversos momentos do meu mestrado dando apoio pessoal, compartilhando conhecimento, experiência e, muitas vezes, uma xícara de café durante uma simples conversa.

Mais uma vez, muito obrigada!

## RESUMO

BILLO, Dâmaris. **Tempo de secagem de árvores de *Eucalyptus dunnii* e ajuste das facas do picador na qualidade de cavacos para fins energéticos.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler. Coorientadores: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Graziela Baptista Vidaurre e Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito do tempo de secagem de árvores inteiras em campo e do ajuste de facas do picador na qualidade dos cavacos de *Eucalyptus dunnii* produzidos para alimentação energética de caldeiras. A pesquisa foi desenvolvida na cooperativa Castrolanda, Castro – PR, em plantio de *E. dunnii* com sete anos de idade. Foram avaliados nove tipos diferentes de cavacos, resultantes da interação entre três períodos de secagem das árvores e três ajustes de facas do picador. Estudou-se umidade, densidades básica e a granel, teor de cinzas, poderes caloríficos superior, inferior e útil, índice de valor combustível e granulometria dos cavacos. Propôs-se um índice de qualidade energética para os cavacos como parâmetro de comparação. Os cavacos possuem densidade básica igual a 0,506 g/cm<sup>3</sup> e poderes caloríficos superior e inferior iguais a 4543,667 kcal/kg e 4219,667 kcal/kg. A umidade diferiu significativamente entre os tratamentos, de modo inversamente proporcional ao tempo de secagem. O teor de cinzas também apresentou diferença significativa, no entanto, não foi possível observar um padrão de comportamento. O poder calorífico útil e o índice de valor combustível diferiram entre os tratamentos em função da umidade da madeira, apresentando uma relação linear positiva. No entanto, o índice de valor combustível se mostrou mais eficiente que o poder calorífico útil na avaliação energética do material. Houveram diferenças significativas na granulometria e na densidade a granel devido aos diferentes ajustes de facas do picador e tempo de secagem do material em campo. Todos os cavacos produzidos com 90 dias de secagem das árvores foram considerados energeticamente ineficientes. O cavaco produzido com 150 dias de secagem e com ajuste de picador com 4 facas mais 1 calço se mostrou o melhor. Considerando o material com 120 dias de secagem, o ajuste do picador com 4 facas é o que fornece um cavaco de qualidade semelhante ao melhor tratamento. Para umidades diferentes de árvores a serem cavaqueadas, visando-se o mantimento de um mesmo padrão de qualidade, deve-se adotar diferentes ajustes de facas no picador.

**Palavras-chave:** Biomassa florestal; Biocombustíveis; Caldeiras – combustíveis; Processamento da madeira; Qualidade dos produtos.



## ABSTRACT

BILLO, Dâmaris. **Drying time of *Eucalyptus dunnii* trees and the adjustment of chopper knives on the quality of chips for energy purposes.** 2019. Dissertation (Masters in Forest Sciences) - Federal University of Espirito Santo, Jeronimo Monteiro, ES. Advisor: PhD. Nilton Cesar Fiedler. Co advisors: PhD. Graziela Baptista Vidaurre and PhD. Eduardo da Silva Lopes.

The aim of this research was to evaluate the effect of the drying time of trees in the field and the adjustment of chopper knives on the quality of the *Eucalyptus dunnii* chips produced for the energy supply of boilers. The research was carried out at the cooperative Castrolanda, Castro - PR, at the planting of *E. dunnii* with seven-years-old. Nine different types of chips were evaluated, resulting from the interaction between three tree drying periods and three adjustments of chopper knives. It was studied moisture, basic and bulk densities, ash content, upper, lower and useful calorific powers, fuel value index and chip particle size. An energy quality index for the chips was proposed as a parameter of comparison. The chips have basic density of 0.506 g/cm<sup>3</sup> and upper and lower calorific powers equal to 4543.667 kcal/kg and 4219.667 kcal/kg. The moisture content differed significantly between the treatments, inversely proportional to the drying time. The ash content also showed a significant difference; however, it was not possible to observe a behavior shape. The useful calorific value and the fuel value index differed among the treatments due to the moisture of the wood, presenting a positive linear relationship; however, the fuel value index proved to be more efficient than the useful calorific value in the energy evaluation of the material. There were significant differences in granulometry and bulk density due to the different adjustment of chopper knives and drying time of the material. All the chips produced with 90 days of drying of the trees are energetically inefficient. The chip produced with 150 days of drying and with chopper adjustment with 4 knives plus 1 chock was the best. Considering the material with 120 days of drying, the chopper adjustment with 4 knives is what provides a chip of quality similar to the best treatment. Considering different moisture of tree to be chipped, aiming at keeping the same quality average, different knife adjustments must be adopted in the chopper.

**Keywords:** Forest Biomass; Biofuels; Boilers – fuels; Wood processing; Product quality.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
	2.1 Objetivo geral	11
	2.2 Objetivos específicos	11
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>12</b>
	3.1 Matriz energética e setor florestal brasileiros	12
	3.2 Biomassa florestal e cavacos de madeira para energia	13
	3.2.1 Umidade da madeira	14
	3.2.2 Densidade básica da madeira e densidade a granel	15
	3.2.3 Granulometria dos cavacos	16
	3.2.4 Teor de cinzas	17
	3.2.5 Poder calorífico	18
	3.2.6 Eficiência energética e índice de valor combustível	18
	3.3 Colheita florestal e produção de cavacos de madeira	19
	3.4 Caldeiras ou geradores de vapor	23
	3.5 Espécies florestais para biomassa	24
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>25</b>
	4.1 Área de estudo, sistema produtivo e tratamentos	25
	4.2 Amostragem dos cavacos	27
	4.3 Caracterização tecnológica dos cavacos	28
	4.4 Caracterização física dos cavacos	29
	4.5 Proposta de índice de qualidade energética dos cavacos	29
	4.6 Análise dos dados	30
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>31</b>
	5.1 Caracterização tecnológica dos cavacos	31
	5.2 Caracterização física dos cavacos	34
	5.2 Granulometria dos cavacos	34
	5.4 Densidade a granel dos cavacos	40
	5.5 Qualidade dos cavacos de madeira para energia	43
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A busca constante por fontes renováveis e sustentáveis para a produção de energia é um dos principais pontos discutidos e valorizados mundialmente, uma vez que diversas medidas têm sido tomadas visando a redução da utilização dos combustíveis fósseis. Na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015, 195 países assinaram um acordo que visa reduzir as emissões de gases do efeito estufa e o Brasil se comprometeu em reduzir, até 2025, em 37% as emissões de gases e ampliar suas fontes de bioenergia (MMA, 2017). Assim, a utilização da biomassa para a produção de energia e geração de calor é uma questão em pleno desenvolvimento.

O Brasil é referência mundial em utilização de fontes de energia renováveis – enquanto o mundo possui, em média, 14% dessas fontes na matriz energética, o Brasil conta com 43,5%, sendo que a biomassa florestal, representada pela lenha e pelo carvão vegetal, representa 8% da matriz brasileira (EPE, 2018). Existe uma tendência de substituir a lenha por cavacos de madeira devido sua maior eficiência energética, além da maior versatilidade de se obter esse material, que é oriundo do processo de cavaqueamento de árvores provenientes de cultivos adensados, cultivados especificamente para a produção de biomassa para energia, ou dos resíduos da colheita florestal, caracterizados por ponteiros de árvores e galhos.

A principal utilização dos cavacos de madeira no Brasil é a alimentação de caldeiras de geração de vapor para secagem de grãos (NASCIMENTO; BIAGGIONI, 2010). A importância dessa biomassa vem ganhando destaque no comércio brasileiro devido ao aumento observado nos últimos anos na produção grãos, revelando a necessidade de aumentar-se, concomitantemente, a oferta de cavacos de madeira de qualidade energética.

Quase não se encontram dados estatísticos que relatam a quantidade de cavacos de madeira produzida e consumida pelo Brasil, tão pouco há referências cerca do produto nos anuários brasileiros do setor. Contudo, Valverde e autores (2012) afirmam que o mercado nacional de cavacos de madeira se mostra sólido e competitivo entre seus concorrentes derivados do petróleo.

Assim, é preciso progredir, simultaneamente ao crescimento da oferta de cavacos, no desenvolvimento de pesquisas que visem o entendimento e a melhoria contínua do processo produtivo de cavacos, em prol de propiciar qualidade de produto

e produtividade, favorecendo a competitividade comercial e a sustentabilidade deste novo mercado. As características mais utilizadas pelo comércio brasileiro para medida da qualidade energética dos cavacos são poder calorífico útil, teor de umidade, teor de cinzas e granulometria.

O poder calorífico útil é uma das principais características da biomassa, pois representa a quantidade real de energia que o material é capaz de liberar na combustão. O fator de principal influência nessa característica é a umidade da madeira, que por sua vez tem o tempo de secagem da madeira como seu principal influenciador, já que é um reflexo das condições ambientais das quais o material esteve exposto.

Além de influenciar na umidade, observa-se na prática que o tempo de secagem também pode afetar o teor de cinzas, indesejável na produção de energia por representar material não-madeireiro e gerar incrustações nas caldeiras. Já a granulometria é ditada, principalmente, pelos ajustes empregados no tipo de picador – principal máquina do processo produtivo de cavacos. Tal característica reflete a forma e o tamanho do produto, tendo grande importância pois as caldeiras possuem especificações de tempo de queima que são afetadas pela granulometria do material combustível, de modo que cavacos não padronizados à granulometria podem gerar ineficiência no sistema.

Deve-se considerar também a densidade a granel, conhecida como densidade de carga, que recebe influência das propriedades da madeira e da umidade e granulometria dos cavacos, representando a quantidade de material presente em um determinado sólido, sendo de importância na questão do transporte dos cavacos. As propriedades tecnológicas da madeira, como densidade e umidade, podem influenciar no desempenho do picador; entretanto, poucas são as referências que abordam como as propriedades do material em conjunto com os atributos do picador afetam as características dos cavacos gerados. Sendo o tempo de secagem da madeira e o ajuste de facas do picador são variantes flexíveis no processo produtivo, surge o seguinte questionamento: – **Como o ajuste do picador e o tempo de secagem da madeira influenciam na qualidade energética dos cavacos gerados?**

A qualidade de cavacos de madeira para energia deve estar relacionada com valores compatíveis de poder calorífico útil, granulometria, baixo teor de cinzas e alta densidade a granel. O entendimento do efeito do tempo de secagem e do ajuste do picador contribuirá para o entendimento de como conduzir o processo produtivo visando cavacos de melhor qualidade para emprego na indústria energética.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito do tempo de secagem de árvores inteiras em campo e do ajuste de facas do picador na qualidade dos cavacos de *Eucalyptus dunnii* produzidos para alimentação energética de caldeiras.

### 2.2 Objetivos específicos

- Estudar o teor de umidade, o teor de cinzas, o poder calorífico útil e o índice de valor combustível de cavacos com três tempos diferentes tempos de secagem em campo e comparar os resultados de poder calorífico útil e índice de valor combustível;
- Avaliar a granulometria e a densidade a granel de nove tipos diferentes de cavacos originários da relação três tempos diferentes de secagem de árvores em campo vs três tipos diferentes de ajuste de facas no picador; e
- Propor um índice de qualidade energética para os cavacos de madeira como parâmetro de comparação.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Matriz energética e o setor florestal brasileiros

Matriz energética é o conjunto das fontes de energia disponíveis e utilizadas por um país ou região. A matriz mundial é marcada pela grande dependência de fontes não renováveis (85,9%), principalmente o petróleo (31,7%), o carvão mineral (28,1%) e do gás natural (21,6%). Já no Brasil esse valor cai para 56,4% – o percentual de utilização de petróleo (36,5%) é semelhante ao padrão mundial, o de gás natural é significativamente inferior (12,3%), mas a grande diferença está na baixa utilização do carvão mineral (5,5%) (MME, 2017).

Fontes renováveis de energia são aquelas em que não há possibilidade de esgotamento com o uso ao longo do tempo, como a hídrica, a solar, a eólica, a geotérmica, a maremotriz, os biocombustíveis e a biomassa (EPE, 2018). O Brasil é referência mundial na utilização de fontes renováveis (43,5%), com grande destaque na matriz do setor de energia elétrica que conta com 84% de tais fontes, enquanto a matriz mundial dessa energia conta com apenas 23% (MME, 2017).

A problemática do setor de energia elétrica brasileira está no uso excessivo da fonte hídrica (61%): os impactos ambientais provenientes das instalações de usinas hidroelétricas são constantemente discutidos e, além do mais, o Brasil tem enfrentado grandes crises hídricas desde 2003 (ANEEL, 2018). Entretanto, quando consideramos todo o contexto de produção de energias, a cana de açúcar representa a maior fonte de energia renovável (17,5% da matriz total) e a fonte hídrica se torna a segunda (12%) (EPE, 2018).

A terceira maior fonte de energia renovável brasileira é o conjunto lenha e carvão vegetal, que representa 8% da matriz, sendo utilizado em termoelétricas e na geração de calor (EPE, 2018). Existe uma tendência mundial de substituição da lenha por cavacos de madeira devido à melhor eficiência energética do último em relação ao primeiro (NASCIMENTO; BIAGGIONI, 2010; SHMULSKY; JONES, 2011). Entretanto, ainda não se tem contabilizado sua representatividade nas matrizes nacional e mundial.

Desde a década de 1970 os estudiosos apontam os potenciais do manejo de florestas plantadas de curta duração para produção de biomassa energética; contudo,

atualmente a importância dessas florestas vem se intensificando devido à demanda de se substituir os combustíveis fósseis (SHMULSKY; JONES, 2011). As principais diferenças entre essas e as florestas plantadas tradicionais estão no menor ciclo de corte e no menor espaçamento entre as árvores, o que formará uma floresta de alta densidade de árvores e com árvores de diâmetros menores (COUTO e MÜLLER, 2008).

A indústria brasileira de florestas plantadas é referência mundial por seu desenvolvimento inovador e sua produção de baixo custo e alta produtividade, com mais de 7,8 milhões de hectares plantados, sendo 5,7 milhões ocupados por plantios de eucalipto. Atualmente, o setor é responsável por 1,1% de toda a riqueza gerada no País, garantindo aos cofres públicos R\$ 11,4 bilhões em tributos por ano, e fornecendo à população 3,7 milhões de empregos em 2016 (PADILHA, 2009; IBÁ, 2017). Quanto às florestas para fins energéticos, o país é considerado um dos poucos que as produzem em larga escala (BNDES, 2011).

O Brasil é um dos produtores de celulose de menor custo do mundo. Porém, fatores como o crescimento do custo de energia, combustíveis, e fertilizantes, e a valorização da força de trabalho e das terras tem elevado os custos de produção (BRANT, 2012). Ainda assim, mesmo com a retração em praticamente todos os setores econômicos brasileiros no ano de 2016, o setor florestal foi um dos menos afetados, apresentando queda de apenas 3,3% no PIB, enquanto a economia como um todo recuou 3,6%, a indústria em geral 3,8% e a agropecuária 6,6% (IBÁ, 2017).

O caminho da sustentabilidade passa pela criatividade e inovação, pelo desenvolvimento tecnológico, pelo aumento da produtividade, automação e mecanização das atividades, pela diversificação e pela produção de produtos cada vez mais valiosos e complexos. Tem-se, portanto, o grande desafio de fazer cada vez mais, com cada vez menos (BRANT, 2012).

### **3.2 Biomassa florestal e cavacos de madeira para energia**

A biomassa é um recurso renovável procedente de material orgânico, seja animal ou vegetal (CERATTO; FARIA, 2013). Do ponto de vista energético, biomassa é toda matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia, sendo que esta energia pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor (ANEEL, 2002).

Assim como o petróleo, a biomassa é um hidrocarboneto, porém possui átomos de oxigênio em sua composição química, diferenciando-se dos combustíveis fósseis; a assiduidade desses átomos de oxigênio na composição da biomassa faz com que a mesma demande menos quantidade do ar, ocasionando assim menos poluentes na atmosfera (RENDEIRO; NOGUEIRA, 2008).

Biomassa florestal é toda biomassa proveniente – direta ou indiretamente – da floresta, dentre as quais podemos citar: briquetes, péletes, etanol de segunda geração, licor negro, resíduos da colheita florestal, lenha, carvão e cavacos de madeira.

Os cavacos são pequenos pedaços de madeira, de comprimento entre 5 e 50 mm, provenientes da picagem de árvores ou de biomassa residual madeireira, contendo um pequeno percentual de partículas mais longas e de finos (GRUNKRAUT, 2012). A qualidade do cavaco depende da tecnologia utilizada na sua produção e, principalmente, da matéria-prima; sendo assim, a caracterização da madeira é indispensável, sendo realizada pela determinação das propriedades tecnológicas – teor de umidade, densidade básica, densidade a granel e granulometria, teor de cinzas e poder calorífico (MOERS et al., 2011).

### 3.2.1 Umidade da madeira

A umidade refere-se a presença de água no material. Apesar de não ser uma característica intrínseca da madeira, é um parâmetro que afeta o desempenho da madeira quanto as suas propriedades físicas e tecnológicas, o que torna seu estudo indispensável (SILVA; OLIVEIRA, 2003).

A secagem é o processo de redução da umidade até um determinado teor (SEVERO, 2007; JANKOWSKY, 1990). Durante a secagem ocorre a movimentação da água presente no interior da madeira das zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade (SEVERO, 2007). Quando se atinge a situação em que as paredes celulares estão saturadas e os lumes e os espaços intercelulares estão anidros, a umidade está em um ponto denominado Ponto de Saturação das Fibras (PSF); é apenas abaixo desse ponto que ocorrem alterações significativas nas propriedades físicas e tecnológicas da madeira (GALVÃO; JANKOWSKY, 1988). De maneira geral, o PSF situa-se em torno de 30% de umidade (SIMPSON, 1991).

Visando a produção de energia, a umidade é um dos parâmetros mais influentes na eficiência energética. Havendo presença de água no material



combustível faz-se necessário o dispêndio de energia para evaporação da mesma antes de se iniciar a combustão do material propriamente dita; isso representa redução do poder calorífero útil e, conseqüentemente, da eficiência energética (VALE, 2000). Além disso, quando a umidade do material combustível não é homogênea, o sistema demanda um grande número de ajustes, o que dificulta a combustão (BRITO, 1986; BARCELLOS et al., 2005).

Ferreira e colaboradores (2007) estudaram a influência da umidade no poder calorífico da madeira de *Pinus taeda* e corroboraram que os materiais com maior umidade apresentam menor poder calorífico.

### 3.2.2 Densidade básica da madeira e densidade a granel

A densidade constitui uma das propriedades físicas mais importantes da madeira, pois dela dependem a maior parte de suas propriedades físicas e tecnológicas, servindo na prática como uma referência para a classificação da madeira. Esta é definida como a relação entre a massa e o volume de um corpo e, conseqüentemente, é um reflexo fiel da quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume ou, de forma inversa, do volume de espaços vazios existentes na madeira (MORESCHI, 2010).

Pode-se descrever a densidade de várias formas, dependendo da condição de umidade do material. A densidade básica (DB) relaciona a massa da madeira anidra (TU igual a 0%) com o seu respectivo volume saturado – TU acima do PSF (OLIVEIRA, 1997). Sendo assim, a propriedade que melhor expressa a qualidade da madeira para seus diversos usos (RIBEIRO; FILHO, 1993).

Madeiras mais densas geralmente produzem cavacos mais espessos e menos homogêneos quanto a dimensão e forma (FOELKEL, 2009), uma vez que é mais dura e mais difícil para picar (PARHAM, 1983).

Devido à dificuldade de se medir o volume exato de materiais particulados, como resíduos e cavacos, outra forma para obter a densidade da madeira é a densidade a granel, relação entre o peso do material e o volume de um recipiente, conforme a NBR 6922 (ABNT, 1983).

A densidade a granel é importante pois ela determina, por exemplo, a capacidade de carga do veículo que irá transportar o cavaco ou então a capacidade de armazenagem de silos; quando a densidade a granel do material é baixa, exige-se maior capacidade de carga ou de armazenagem. Um dos fatores que mais exercem

influência sobre esta propriedade é o tamanho do material, ou seja, a granulometria do cavaco (SEIXAS, 2008).

### 3.2.3 Granulometria dos cavacos

A granulometria é um ensaio que estabelece as dimensões de partículas e seus percentuais de ocorrência em um determinado conjunto. Com base neste ensaio é possível determinar o tipo e o tamanho dos cavacos e prever a energia que será liberada na combustão, assegurando o fluxo contínuo do combustível no sistema (KOLLMAN et al., 1975).

Quanto menor o tamanho de uma partícula, maior é a superfície de contato da mesma (PEREIRA, 2009). Em outras palavras, para uma mesma quantidade de material, quanto mais fragmento este estiver, maior é a quantidade de áreas disponíveis para reação. Ou seja, quanto menor for o cavaco, maior é a velocidade da reação de combustão.

A granulometria ideal é definida em função das necessidades energéticas do sistema e das características da caldeira, levando-se em consideração a velocidade ideal de reação. Apesar da diversidade de tamanhos do material favorecer uma melhor acomodação de carga (CERAGIOLI, 2013), a homogeneidade é mais interessante no ponto de vista energético devido à algumas dificuldades que a heterogeneidade acarreta.

A presença de cavacos maiores do que o planejado (*over*) para a carga dificulta o fluxo de material pelo sistema, podendo gerar entupimento, assim como a presença de partículas muito finas (*finos*) proporcionam variação de calor câmara de combustão e formação de cinzas, uma vez que se queimam mais rápido (GRUNKRAUT, 2012).

Existem diferentes classes granulométricas para os cavacos, conforme apresentado na tabela 1. Visando a produção de cavacos homogêneos e de qualidade, a granulometria principal deve representar uma fração maior que 80% do peso total, a fração de finos não deve ser maior do que 5% e a de *over* não deve ser maior do que 1% (LIPPEL, 2014).

Conforme é possível observar na tabela 1, o tamanho mínimo de um cavaco deve ser de 3,15mm e o tamanho máximo varia de acordo com a classe de tamanho que o material precisa ter. O tamanho de partícula que define a fração de *over* também é variável em função da classe de tamanho, não devendo ultrapassar, como já dito anteriormente, 1% do peso total.

**Tabela 1.** Tabela Granulométrica: Classificação da granulometria de cavacos

<b>Especificação de tamanho e distribuição das partículas de cavaco de madeira</b>			
<b>Classe de tamanho</b>	<b>Fração Principal (&gt;80% do peso)</b>	<b>Fração de Finos (&lt;5% do peso)</b>	<b>Fração de Over (Máx 1%&gt;X)</b>
P16	3,15mm<T<16mm	<1mm	X=25mm
P25	3,15mm<T<25mm	<1mm	X=45mm
P45	3,15mm<T<45mm	<1mm	X=63mm
P63	3,15mm<T<63mm	<1mm	X=100mm
P100	3,15mm<T<100mm	<1mm	X=200mm

FONTE: Lippel, 2014. Adaptado pela autora.

A Lippel (2014) estabelece que a fração de finos é representada por partículas de tamanho igual ou inferior a 1mm. Entretanto, pode-se estabelecer o valor de 3,15mm, já que este é o tamanho citado como o mínimo ideal para o cavaco.

As definições das classes granulométricas supracitadas é o mais próximo que existe a respeito de qualidade de cavacos de madeira para energia no Brasil. Entretanto, existem normas estrangeiras, como a europeia e a canadense, que situam as especificações para os biocombustíveis sólidos, incluindo os cavacos de madeira.

### 3.2.4 Teor de cinzas

A cinza é um resíduo mineral proveniente de componentes minerais tanto do lenho quanto da casca (COTTA, 1996). Ou seja, é o teor de materiais inorgânicos que não reagem com a combustão da madeira (BRAND, 2010).

O principal mineral encontrado em cinzas de madeira é o cálcio, seguido do potássio e do magnésio, sendo possível encontrar também pequenas quantidades de sódio, manganês, ferro, alumínio, zinco, cobre e cromo, além de radicais como carbonatos, silicatos, cloretos, sulfatos (FENGEL; WEGENER, 1984; FREDDO, 1997).

O teor de cinzas varia em função da espécie, da posição em que a amostra foi retirada na árvore e entre árvores do mesmo local de crescimento, podendo variar também devido à contaminação do material por areia durante a colheita florestal (THÖRNQVIST, 1985 *apud* BRAND *et al.*, 2012).

Entretanto, minerais presentes na madeira são considerados indesejáveis do ponto de vista energético, pois, quando queimados em fornalhas e caldeiras, formam incrustações nos equipamentos e tubulações (BARCELOS, 2007). Assim, quanto menor o teor de cinzas, melhor. As cinzas serão resíduos na combustão, exigindo maior frequência de limpeza dos depósitos de cinzas quando se utiliza combustíveis

com maiores teores de minerais, podendo ainda gerar incrustações nos equipamentos de combustão, demandando aumento de manutenções (OBERNBERGER; THEK, 2010).

### 3.3.5 Poder calorífico

O poder calorífico é a medida da quantidade de energia que um combustível libera na combustão completa de uma unidade de sua massa (QUIRINO et al., 2004), podendo ser representado de formas distintas: poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU).

A combustão completa é uma reação de queima que ocorre com a presença de um combustível (matéria orgânica) e um comburente (O<sub>2</sub>) em que 100% do material combustível é consumido, resultando em gás carbônico (CO<sub>2</sub>), água e calor (energia) (LOPES, et al., 2003).

O PCS é a medida da máxima quantidade de energia que um combustível pode liberar considerando a água resultante em seu estado líquido. No entanto, devido as condições térmicas de uma caldeira, a água resultante da reação é evaporada demandando calor latente. Assim, a energia efetiva de um combustível é o PCI, medida da quantidade de energia que um combustível libera desconsiderando o calor latente do vapor de água (PIMENTA; BARCELLOS, 2000).

A água supracitada na reação de combustão trata-se da água de constituição da madeira. Entretanto, no material há também a presença da água referente a sua umidade, que influencia diretamente no poder calorífico uma vez que o sistema perderá energia para evaporá-la antes de se iniciar a combustão (BRITO, 1986). Assim, o PCU é o que melhor representa a realidade do combustível, pois leva em consideração também o TU do material, sendo calculado por meio da fórmula  $PCU=PCI*[(100- TU)/100]-6* TU$  (BRITO, 1993; VALE; BRASIL, 1997).

### 3.3.6 Eficiência energética e índice de valor combustível

Eficiência é definida no Dicionário Aurélio (FERREIRA, 2010) como sendo a “capacidade de realizar tarefas ou trabalhos de modo eficaz e com o mínimo de desperdício”. Pode-se dizer, portanto, que a eficiência energética de um combustível é a capacidade que este possui de fornecer energia a um sistema de modo eficaz e com o mínimo de desperdício. O poder calorífico útil é muito utilizado no âmbito

comercial brasileiro para representar a eficiência energética do combustível. Entretanto, outros fatores devem ser analisados conjuntamente, como densidade básica, teor de cinzas e umidade.

Afim de elaborar um parâmetro de comparação entre biomassas de diferentes espécies florestais quanto a sua qualidade como combustível, Purohit e Nautiyal (1987) criaram o Índice de Valor Combustível (IVC), que leva em consideração todas essas características desejáveis. O IVC é determinado pela fórmula  $IVC=(PCS*DB)/(TU*TC)$  e quanto maior é o seu valor, mais eficiente energeticamente é o material.

A granulometria também influencia indiretamente na eficiência energética, já que a superfície de contato do material influencia na reatividade e na velocidade de reação. Deste modo, a madeira picada em cavacos possui maior eficiência energética em comparação às toras de lenha devido sua maior superfície de contato (NOGUEIRA et al., 2000).

### **3.3 Colheita florestal e produção de cavacos de madeira**

A colheita florestal é um conjunto de operações que visa cortar e extrair árvores do talhão para um local pré-determinado de estoque até a etapa de transporte, sendo uma atividade de grande importância do ponto de vista técnico-econômico pois exige alto desempenho na produção e no controle de custos. Estas operações podem ser realizadas de forma manual (não utilizada em escala comercial), semimecanizada (com motosserra) ou totalmente mecanizada (com máquinas florestais), variando de acordo com o grau de tecnologia empregado, mão-de-obra, uso e tipos de equipamentos aplicados (MACHADO, 2014).

A mecanização da colheita proporciona reduções drásticas em prazos e favorece o aumento da produtividade e da humanização do trabalho florestal, assim como as máquinas florestais utilizadas na colheita mecanizada proporcionam um aumento significativo na capacidade operacional, uma vez que se torna possível realizar maior quantidade de trabalho em menos tempo (WADOUSKI, 1997; MACHADO, 2014).

O processo de mecanização na colheita florestal brasileira ocorreu com a inserção de tecnologias trazidas de outros países e foi tão bem-sucedida que outras áreas florestais, como a silvicultura, têm buscado seguir os mesmos métodos de

inovação (IPEF, 2018). No entanto, em locais em que os plantios florestais são de pequena escala e se encontram sob revelo irregular, o tráfego de máquinas e a mecanização da colheita se torna inviável, predominando a colheita semimecanizada (PESCADOR et al., 2013).

As operações da colheita florestal são corte e processamento das árvores, e empilhamento e extração dos fustes ou das toras, dependendo do sistema de colheita empregado (MACHADO, 2014). Geralmente, o processamento se divide em destopamento (retirada da copa), desganhamento (retirada dos galhos), traçamento (seccionamento do fuste) e descascamento (retirada da casca). Contudo, nos casos em que as árvores serão transformadas em cavacos de madeira o processamento se resume no cavaqueamento dos fustes.

A maneira e a ordem como as operações da colheita ocorrem é definida pelo sistema de colheita (MACHADO, 2014). Um sistema de colheita florestal é um conjunto de operações relacionadas entre si, definidas por uma sequência, um local e um objeto de trabalho, envolvendo toda a cadeia de produção em busca de um objetivo comum (MALINOVSKI, 1981 apud MALINOVSKI, 2008).

Os sistemas de colheita são classificados de acordo com a forma que a árvore possui quando é extraída para fora do talhão, sendo estes cinco (FAO, 1977 apud RODRIGUES, 2018):

1. Sistema de toras curtas (*cut-to-length*): as árvores são cortadas e processadas no interior do talhão e extraídas na forma de toras, com até sete metros de comprimento, para as laterais das estradas ou estaleiro;
2. Sistema de fuste (*tree-length*): as árvores são cortadas, desganhadas e destopadas no interior do talhão e o fuste, com mais de sete metros, é extraído até as laterais das estradas, ou ao estaleiro, para as demais etapas do processamento;
3. Sistema de árvores inteiras (*full-tree*): as árvores são cortadas no interior do talhão e extraídas inteiras (sem raízes) até as laterais das estradas, ou ao estaleiro, para o processamento;
4. Sistema de árvores completas (*whole-tree*): as árvores são arrancadas com partes de suas raízes e extraídas até as laterais das estradas, ou ao estaleiro, para o processamento; e
5. Sistema de cavaqueamento (*chipping*): as árvores são cortadas no interior do talhão e extraídas inteiras (sem raízes) até as laterais das estradas, ou ao estaleiro, para serem transformadas em cavacos.

Apesar da definição supracitada do sistema de cavaqueamento ser consagrada no Brasil, percebe-se – pela definição de classificação dos sistemas de colheita – que o mesmo nada mais é do que um sistema de árvores inteiras em que as árvores são processadas na forma de cavacos.

Há diversas máquinas florestais no mercado e cada vez mais se investe no desenvolvimento de novas tecnologias. Contudo, as máquinas mais utilizadas em sistemas de árvores inteiras são o *feller-buncher* para o corte, o *skidder* convencional ou o *clambunk* para a extração (MACHADO, 2014), e o picador – nos casos de processamento para produção de cavacos.

O *feller-buncher* (Figura 1a) corta árvores individualmente, as acumula em seu cabeçote e embandeira o feixe de árvores no solo. Já o *skidder* convencional (Figura 1b) é um trator florestal articulado com cabine e uma garra, que prende os feixes de toras ou árvores, de cima para baixo, e os arrasta; o *clambunk* (Figura 1c), por sua vez, é um tipo de *skidder* que possui a garra invertida (ROBERT, 2018). O picador (Figura 1d) é uma máquina que possui lâminas e facas, acopladas a um disco ou tambor, que cortam a madeira com alta velocidade de rotação, gerando assim a madeira picada que chamados de cavaco, sendo alimentado por um carregador (CANTO, 2009). Os cavacos produzidos geralmente são lançados pelo próprio picador diretamente em carretas containers para o transporte final (Figura 2).



**Figura 1.** A – *Feller-buncher*; B – *Skidder* Convencional; C – *Skidder Clambunk*; e D – *Picador*. FONTE: a autora.



**Figura 2.** Picador processando a madeira depositando o cavaco diretamente na carreta e sendo alimentado por um carregador. FONTE: a autora.

O cavaqueamento é, portanto, a redução da madeira em partículas menores, preparando o material para a conversão energética, pela redução no tamanho e homogeneização do material (CANTO, 2009), facilitando também o transporte do material.

Existem dois tipos de cavacos para energia: os produzidos a partir dos resíduos florestais da colheita, em que o objetivo principal da floresta não era energético, e os produzidos a partir de uma floresta energética, ou seja, o objetivo principal desta é a geração de material combustível. No primeiro caso, adota-se o sistema de colheita mais viável para o objetivo principal da floresta e recolhe-se os resíduos florestais para a futura produção dos cavacos. Já no segundo, o sistema utilizado é, na maioria dos casos, o de árvores inteiras.

### **3.4 Caldeiras ou geradores de vapor**

As caldeiras são equipamentos amplamente utilizados na indústria e na geração de energia, visto que são muito importantes para processos produtivos (MELLO, 2010). Comumente chamadas de geradores de vapor, são componentes essenciais em qualquer atividade que necessite de vapor para o seu funcionamento.

A primeira tentativa do homem no sentido de produzir vapor com objetivos energéticos ocorreu no século II, a.C. Porém, somente na Revolução Industrial é que



o uso de vapor pressurizado para movimentar máquinas e equipamentos veio a apresentar grande repercussão (ALTAFINI, 2002).

O surgimento das máquinas destinadas a gerar vapor no início do século XVIII, foi promovido pela necessidade de se encontrar alternativas na geração de calor, que substituíssem a queima direta de carvão fóssil. Porém, no decorrer dos anos, a praticidade e a versatilidade de sua utilização tornaram o vapor d'água indispensável em diversos setores industriais (BAZZO, 1995).

A caldeira, ou gerador de vapor, é um equipamento preenchido por água, possuidor de uma fonte de energia (combustível) que libera calor fazendo com que a água esquite até se transformar em vapor, que será transportado por meio de tubos de aço aos pontos que utilização (LEITE; MILITÃO, 2008; BOTELHO; BIFANO, 2011). O vapor é utilizado para o acionamento de máquinas térmicas, para a geração de potência mecânica e elétrica, assim como para fins de aquecimento e secagens em processos industriais (PERA, 1990).

Combustível é qualquer substância que, ao reagir com um comburente, libera energia na forma de calor, podendo ser líquidos (óleo combustível e diesel), gases (gás natural) ou sólidos (biomassa: bagaço de cana, diversos resíduos agrícolas, carvão, lenha e o cavaco de madeira) (BOTELHO; BIFANO, 2011). Entretanto, quando pensamos nas necessidades energéticas de uma caldeira, em relação à combustíveis, o que se deve observar é a quantidade de energia que o mesmo lhe fornecerá.

Apesar de combustíveis líquidos e gasosos fornecerem mais energia ao sistema, a biomassa é o principal combustível para caldeiras do Brasil em decorrência de seu baixo custo e de sua abundância (ARRUDA, 2009). Além disso, a disponibilidade de biomassa e o aumento das tecnologias para seu uso mais eficiente e com menos emissões poluentes, faz este combustível ser mais atrativo em relação aos demais (QUAAK; KWOF; STASSEN, 1999).

### **3.5 Espécies florestais para biomassa**

Dentre as principais espécies de fornecimento de biomassa para geração de energia destaca-se as do gênero *Eucalyptus spp.* por sua alta produtividade (CORTEZ et al., 2009). A produção anual de um hectare de eucalipto, com crescimento médio de 35 m<sup>3</sup>/ha.ano, é de 10 toneladas de massa seca absoluta, gerando 4.500 kcal/kg,

combustível de biomassa equivalente a quatro toneladas de petróleo (MORITA, 2007). Esses valores fazem com que os custos de geração da energia com madeira de reflorestamento sejam minimizados (MACEDO, 2003).

Grande parte das florestas plantadas no Brasil vem de plantios clonais de alta produtividade ou de sementes melhoradas, com adaptação a fatores adversos de clima, solo e água (ABRAF, 2007). O *Eucalyptus dunnii*, tem ocupado grande espaço no mercado brasileiro, com extensas áreas de florestas plantadas, principalmente na região sul do Brasil devido à sua resistência a baixas temperaturas e geadas.

O *Eucalyptus dunnii* foi introduzido no Brasil em 1964, na região de Monte Alegre – Paraná e, apesar de se adaptar melhor a solos úmidos e férteis, apresentou bom desenvolvimento em solos oriundos de rochas sedimentares (SPELTZ; MONTEIRO, 1982). Os valores médios de densidade básica, teor de cinzas e poder calorífico superior para a madeira com casca da espécie é 0,486 g/cm<sup>3</sup>, 0,50-0,85% e 4.696 kcal/kg, respectivamente (BARRICHELO *et al.*, 1976; BRAND, 2007).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo, sistema produtivo e tratamentos

A pesquisa foi realizada na cooperativa agroindustrial Castrolanda, localizada em Castro – região centro-oriental do estado do Paraná, caracterizada predominantemente pelo clima Cfb da classificação de Köppen. A cooperativa produz cavacos de madeira para finalidade energética que são parcialmente utilizados em sua própria linha de beneficiamento de carne, e o restante comercializado para secagem de grãos.

Os plantios florestais da empresa são constituídos por povoamentos seminais de *Eucalyptus dunnii*, conduzidos ao corte raso aos sete anos de plantio. Para este estudo, o corte e a extração das árvores ocorreram entres os meses de março a maio de 2018 e o processamento para produção de cavacos na primeira quinzena de agosto de 2018. Os dados meteorológicos no período citado estão dispostos na tabela 2.

**Tabela 2.** Dados meteorológicos do Município de Castro – PR no período de março a agosto de 2018.

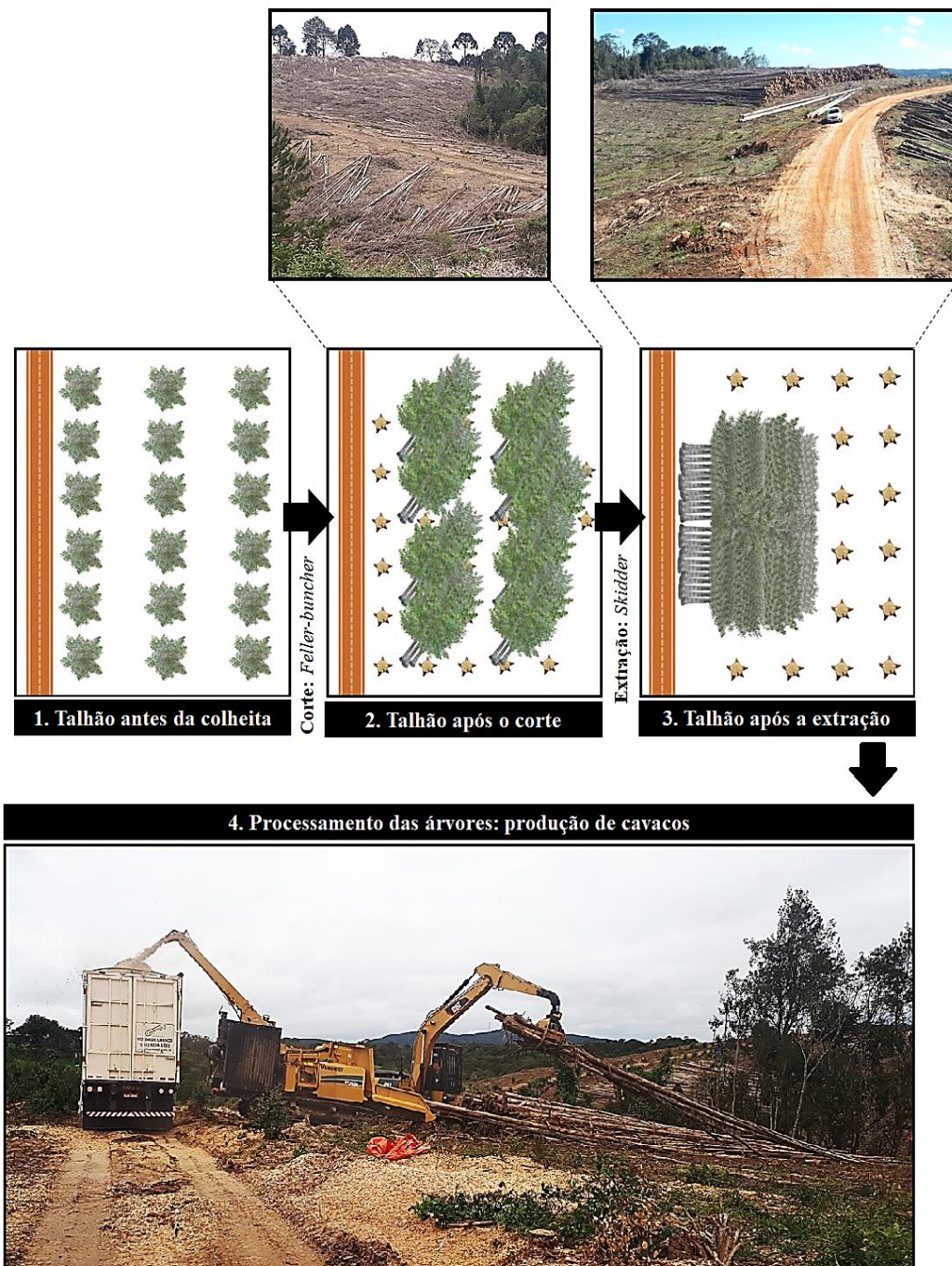
	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto
<b>Precipitação (mm)</b>	216,0	10,2	34,0	88,6	21,4	44,8
<b>Umidade relativa do ar (%)</b>	89,7	84,0	83,3	88,1	79,9	85,0
<b>Radiação solar (MJ/m<sup>2</sup>/dia)</b>	14,7	16,3	12,9	8,4	12,2	13,4
<b>Temperatura do ar (°C)</b>	20,4	18,2	15,5	13,9	14,1	12,9
<b>Velocidade do vento (m/s)</b>	1,6	2,0	2,4	1,8	1,6	2,5

FONTE: Fundação ABC (2018)

A cooperativa trabalha com sistema de colheita de árvores inteiras. As etapas de corte e extração foram realizadas, respectivamente, por um *feller-buncher* e um *skidder*, operadas por uma empresa terceirizada. O processamento das árvores é realizado pela própria cooperativa, à margem da estrada dos talhões, com um picador Vermeer (modelo WC2500TX) alimentado por uma escavadeira Caterpillar com uma grua acoplada. O sistema produtivo está representado na Figura 3.

Dois aspectos da máquina podem ser alterados para o processo produtivo: o ajuste de facas e a velocidade de avanço da alimentação. O ajuste de facas varia de acordo com o número de facas (4 ou 8) e a utilização de calços e a velocidade de avanço é controlada nos comandos da máquina. Durante o desenvolvimento da pesquisa, a velocidade de avanço foi mantida constante em 100% para que não houvesse

interferência na qualidade dos cavacos e no desempenho do picador. O ajuste de facas, nomeado como “ajuste do picador”, foi alterado de acordo com a determinação dos tratamentos propostos, utilizando-se todos os ajustes possíveis para as condições da cooperativa.



**Figura 3.** Processo de produção dos cavacos. FONTE: a autora.

Após a etapa de corte das árvores até a de processamento, decorrem – aproximadamente – 150 dias, para a secagem das árvores, que devem apresentar em média, umidade máxima de 40%, obedecendo os padrões comerciais da empresa e dos

clientes. A etapa de extração não advém em um período pré-determinado, ocorrendo em função de acordos flexíveis entre a cooperativa e a terceirizada. Os cavacos são depositados diretamente, no momento do processamento, em carretas com piso móvel, que fazem o transporte do produto até o seu ponto final de destino.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram determinados nove tratamentos, variando-se o tempo de secagem das árvores (150, 120 e 90 dias) e o ajuste de facas do picador (4 facas, 4 facas mais um calço e 8 facas mais um calço), conforme a matriz representada na Figura 4. O tratamento 1 é o padrão utilizado pela cooperativa e portanto, considerado a testemunha.



**Figura 4.** Matriz dos tratamentos estudados na pesquisa, resultantes da interação entre três tempos diferentes de secagem das árvores em campo vs três ajustes diferentes de facas no picador. FONTE: a autora.

## 4.2 Amostragem dos cavacos

Das pilhas de madeira na margem da estrada, foram retiradas aleatoriamente 9 árvores com diâmetro médio de 20 cm (3 para cada ajuste do picador: 4 facas + 1 calço, 4 facas e 8 facas + 1 calço) de cada pilha referente aos períodos de secagem (90, 120 e 150 dias), totalizando 27 árvores – 3 para cada tratamento. Estas foram retiradas de pontos centrais das pilhas, evitando assim o efeito de borda.

As árvores foram cavaqueadas separadamente por tratamentos, formando-se 9 pilhas de cavacos. Procedeu-se a limpeza do picador entre as trocas de tratamento e garantiu-se que, para todos os tratamentos, as facas estivessem em condições ótimas de afiação. A amostragem do material nas pilhas de cavacos seguiu os procedimentos da NBR 10007 (ABNT, 2004) para amostragem de resíduos sólidos, sendo coletados 40kg de cavaco de cada tratamento para as análises subsequentes.

### 4.3 Caracterização tecnológica dos cavacos

A umidade foi determinada na base úmida de acordo com a NBR 14929 (ABNT, 2003) em triplicata para cada tempo de secagem. A densidade básica foi determinada de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2002) pelo método de máximo teor de umidade. Os cavacos foram imersos em água em um dessecador e permaneceram durante 30 dias, recebendo um vácuo diário, para acelerar a completa saturação das fibras. Em seguida, foram pesados úmidos e colocados para secar em estufa a temperatura de 103°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ), e pesados até que o peso não variasse 0,5g entre duas pesagens sucessivas.

Para as análises de poder calorífico superior (PCS) e teor de cinzas (TC), o material foi triturado em moinho tipo Wiley, conforme a norma T257 om-92 (TAPPI, 1992) e classificado por peneiras. As análises foram efetuadas apenas com a fração que passou na peneira de 40 “mesh” (abertura de 0,42mm), porém, ficou retida em peneira de 60 (0,25mm). Uma vez que o material foi triturado, o fator “ajuste do picador” não exerce mais influência sobre estes testes; assim, foi estudado apenas o fator “tempo de secagem”, estabelecendo apenas 3 tratamentos: 90, 120 e 150 dias de secagem.

O poder calorífico superior foi determinado de acordo com a NBR 8633 (ABNT, 1984). O ensaio foi realizado em duplicata, utilizando-se 0,5g de material anidro e um calorímetro adiabático. O PCI e o PCU foram calculados de acordo com Moreira, Lima e Goulart (2012), conforme as equações 5 e 6.

$$PCI = PCS - 324 \quad (\text{Equação 5})$$

Em que: PCI: Poder calorífico inferior (kcal/kg); PCS: Poder calorífico superior (kcal/kg).

$$PCU = PCI \times \frac{(100-TU)}{100} - (6 \times U) \quad (\text{Equação 6})$$

Em que: PCU: Poder calorífico útil (kcal/kg); PCI: Poder calorífico inferior (kcal/kg); U: Umidade (g/g).

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma M11/77 (ABTCP,1997). O ensaio foi realizado em triplicata, utilizando-se 1g de material anidro, que foram colocados em cadinhos de porcelana e conduzidos para mufla a 600°C por 6 horas. Finalizadas as horas, as amostras foram retiradas da mufla e alocadas em um dessecador para o resfriamento, e em seguida procedeu-se a pesagem e a determinação do teor de cinzas. O índice de valor combustível (IVC) foi calculado conforme Purohit e Nautiyal (1987) – equação 7.

$$IVC = \frac{(PCS \times DB)}{(TC \times U)} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que: IVC: Índice de valor combustível (kcal/m<sup>3</sup>); PCS: Poder calorífico superior (kcal/kg); DB: Densidade básica (g/m<sup>3</sup>); TC: Teor de cinzas (g/g); U: Umidade (g/g).

#### **4.4 Caracterização física dos cavacos**

Os cavacos de cada tratamentos foram submetidos a uma adaptação do teste de separação granulométrica descrito por Ceragioli (2013). Um determinado volume do material foi despejado em um separador de partículas com seis peneiras de malhas 63mm, 45mm, 25mm, 16mm, 8mm, e 5mm, mais um fundo. O equipamento foi balançado por aproximadamente 10 minutos para garantir a movimentação das partículas e em seguida pesou-se a quantidade de cavacos retida em cada peneira, sendo realizadas 6 repetições por tratamento.

Calculou-se então o percentual de cada peneira em relação ao peso total de material despejado e realizado a classificação granulométrica de acordo com o informativo Lippel (2014). Os resultados foram confrontados com as normas europeia EM 1496 (ECS, 2010) e canadense CAN/CSA ISO 17225 (CSA, 2015). Já a densidade a granel (DG) foi realizada com base na NBR 6922 (ABNT, 1983), porém a umidade do material não foi padronizada conforme a norma devido ao intuito de se estudar o efeito de diferentes umidades.

#### **4.5 Proposta de índice de qualidade energética dos cavacos**

Com intuito de se estabelecer um parâmetro de comparação entre os diferentes cavacos estudados nesta pesquisa, propôs-se um índice de qualidade energética de cavacos (Q) por meio de uma somatória, correlacionando as características analisadas

que foram consideradas principais na determinação da qualidade dos cavacos e colocando-se peso de importância para cada uma. Utilizou-se como inspiração a lógica *fuzzy*, que trata de valores que variam entre 0 e 1 em que quanto mais próximos de 1, mais verdadeiros são os valores.

Estabeleceu-se que 50% do índice seria representado pelo valor energético do material, constituindo pelo índice de valor combustível (IVC) por ser mais completo quanto às propriedades correlacionadas em sua equação (equação 7), e 50% pelas propriedades da forma física, sendo 30% devido à homogeneidade da granulometria do material (percentual de cavacos retidos na fração granulométrica principal) e 20% à densidade a granel, por sua importância no transporte – conforme a equação 8.

$$Q = [(0,5 \times IVC) + (0,3 \times FP) + (0,2 \times DG)] \quad (\text{Equação 8})$$

Em que: Q: índice de qualidade energética dos cavacos; IVC: índice de valor combustível; FP: percentual da fração granulométrica principal; DG: densidade a granel.

Antes de se aplicar os parâmetros na equação, os valores de cada conjunto de parâmetro foram divididos pelo maior valor de seu conjunto, obtendo-se assim números de 0 a 1 adimensionais, em que quanto mais próximo de 1 melhor. Desse modo, todos os valores para Q também são adimensionais.

#### 4.6 Análises dos dados

Nas análises de umidade, teor de cinzas, poder calorífico útil e índice de valor combustível foram empregados análise de variância ao nível de 5% de significância para verificar se havia diferença significativa entre os diferentes tempos de secagem em campo, seguida de análise de regressão nos casos de diferença significativa.

Para densidade básica, e poderes caloríficos superior e inferior realizou-se teste de hipótese por meio do teste de t de *Student* a 5% de significância, para confirmar a homogeneidade do material, e estatística descritiva. Para a granulometria foi empenhado apenas estatística descritiva e a DG foi avaliada como um experimento fatorial 3x3, em delineamento inteiramente casualizado, objetivando-se identificar a influência da relação “tempo de secagem vs ajuste do picador”.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização tecnológica dos cavacos

A densidade básica foi de 0,506 g/cm<sup>3</sup> (CV= 0,032), o que revela uma madeira considerada de média densidade (FOELKEL, 2019). Madeiras de média densidade possuem boa trabalhabilidade (ou seja, são boas de serem processadas) pois não proporcionam alta resistência às ferramentas, mas ao mesmo tempo não são demasiadamente flexíveis a ponto de se romperem ao mínimo esforço empregado sobre elas, gerando partículas de tamanhos indesejáveis (KRETSCHMANN, 2010).

O poder calorífico superior (PCS) médio foi 4543,667 kcal/kg (CV= 0,011), valor próximo aos observados por Contiero e Magossi (2016) e Brand (2013). Uma vez que o poder calorífico (4219,667 kcal/kg) foi calculado apenas com base no PCS, seus valores seguem o mesmo comportamento, porém com diferença de 324 kcal/kg entre os valores.

Os valores de umidade, teor de cinzas, poder calorífico superior e índice de valor combustível (tabela 3) apontaram diferença significativa entre os tempos de secagem.

**Tabela 3.** Caracterização energética dos cavacos de *E dunnii* em diferentes tempos de secagem das árvores em campo.

PROPRIEDADE	TEMPO DE SECAGEM DAS ÁRVORES (dias)			CV
	90	120	150	
U (%)	47,037 c	39,093 b	34,197 a	0,007
TC (%)	0,759 b	0,826 c	0,522 a	0,037
PCU (kcal/kg)	1923,950 c	2342,115 b	2600,000 a	0,007
IVC (cal/cm <sup>3</sup> )	64,395 c	71,025 b	128,060 a	0,006

Em que: U – Umidade, TC – Teor de cinzas, PCU – Poder calorífico útil, IVC – Índice de valor combustível, e CV – Coeficiente de variação. Para uma mesma propriedade, médias seguidas de uma mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Para todos os tempos de secagem, a umidade apresentou valores acima do ponto de saturação das fibras (PSF), que corresponde a uma faixa de umidade de 28 a 32%. O período em que as árvores foram colhidas exerce influência na umidade da madeira no processamento das árvores devido às condições climáticas durante o tempo de secagem. As árvores com 150 dias foram cortadas em março, mês com 216 mm de precipitação e umidade relativa do ar (UR) em 89,7%, sendo a época mais úmida do período de estudo. A partir de abril, além da temperatura ter diminuído gradativamente,

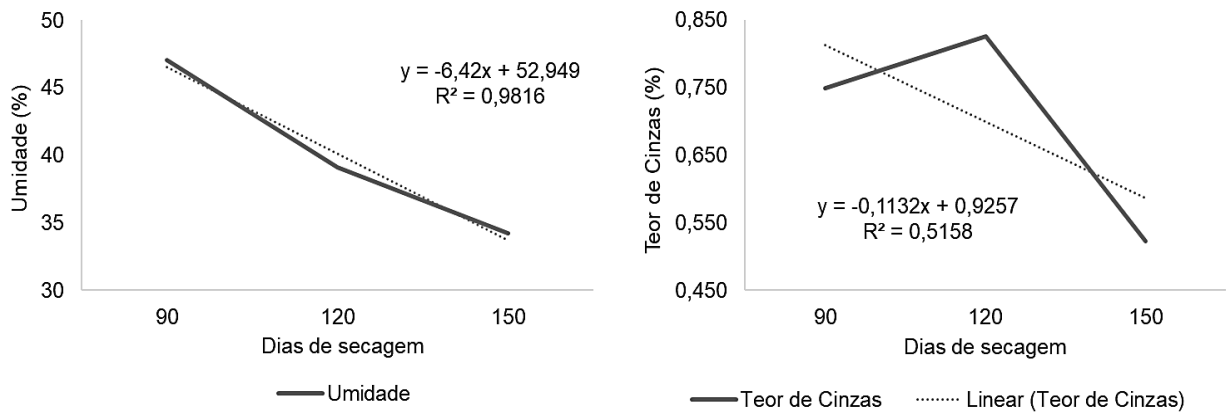
os níveis de precipitação reduziram entre 59% (junho) até 95% (abril), confirmando a característica climática de invernos frios e secos da região. As diferenças nas condições climáticas do ambiente entre os períodos de secagem explicam o porquê de a umidade ter reduzido de forma diferente entre a transição de 120 para 150 dias de secagem e de 90 para 120. Apesar das pequenas variações supracitadas, o coeficiente de determinação da regressão linear da umidade (Figura 7) é 0,9816, indicando alta capacidade do modelo em explicar a relação tempo de secagem vs teor de umidade.

Para todos os três tempos de secagem, o teor de cinzas (TC) está abaixo de 1%, teores considerados ótimos uma vez que acima de 3% são danosos em combustíveis lignocelulósicos por afetarem negativamente o poder calorífico e aumentarem a demanda por manutenções das caldeiras (OBERNBERGER; THEK, 2010). As médias para TC são significativamente diferentes, indicando que houve influência do tempo de secagem nesta propriedade; entretanto, não foi possível identificar um padrão ou uma tendência clara de comportamento ao longo do tempo, o que é confirmado com o coeficiente de determinação da regressão linear indicando que apenas 51,58% dos valores podem ser explicados pelo modelo (Figura 7). Brand (2012) estudou a influência da espécie e do tempo de estocagem da madeira nas alterações ocorridas na biomassa ao longo do tempo e percebeu a mesma situação em relação ao TC para o *E. dunnii*.

O TC na madeira pode ser alterado em função da impregnação de materiais minerais, como a areia, no decorrer da extração da madeira, da estocagem em campo, do transporte, e até mesmo pelas condições de armazenagem da madeira – seja ela em qualquer forma – nos pátios das indústrias. A extração realizada na forma de baldeio diminui as chances de impregnação uma vez que evita o contato com o solo, o que ocorre de modo inverso em uma extração por arraste. Períodos longos de chuva podem lixiviar materiais minerais das toras/cavacos dos topos das pilhas de madeira/cavacos, bem como podem aumentar a impregnação dessas substâncias nas toras/cavacos que ficam na parte inferior das pilhas. Madeiras extraídas e armazenadas com casca estão menos expostas a impregnação devido à barreira de proteção que a casca representa, assim como a barreira promovida com a pavimentação dos pátios de estocagem; entretanto, a casca possui teores mais elevados de cinzas.

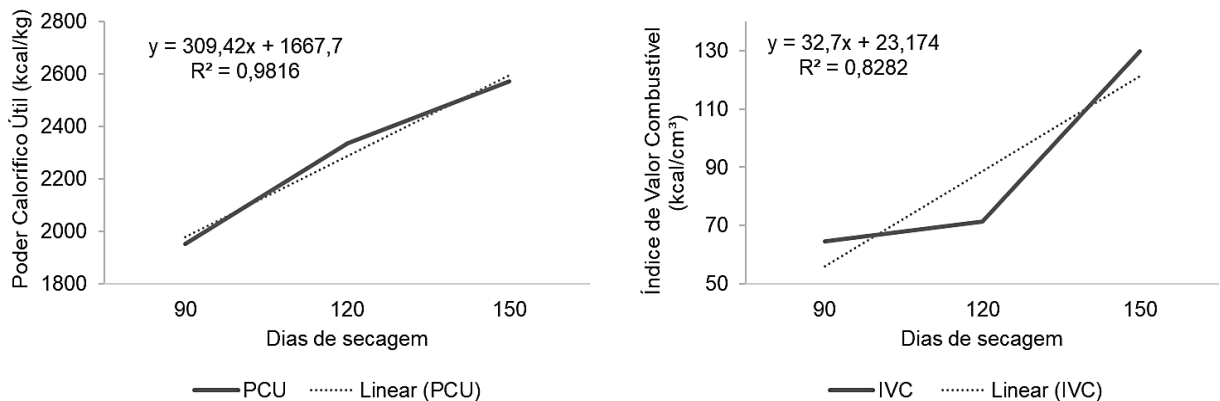
Percebe-se que vários fatores podem interferir no TC, desde os métodos de manejo da madeira até as próprias condições climáticas, demonstrando a necessidade de estudos mais criteriosos para a determinação de uma razão exata para a variação ocorrida no TC. Para o poder calorífico útil (PCU) e o índice de valor combustível IVC é

notório o padrão de comportamento: os valores aumentam à medida que o tempo de secagem progride e a umidade é diminuída (Figura 8).



**Figura 7.** Relação do teor de umidade (TU) e do teor de cinzas (TC) com o tempo de secagem.

O PCU varia apenas em função da umidade, já que o PCI é o mesmo para todos os três tempos de secagem. O modelo de regressão linear possui coeficiente de determinação igual a 0,9816, o que constitui alta capacidade do modelo em explicar os valores observados. Quintilhan e colaboradores (2015) estudaram a capacidade energética de cavacos de madeira com 31% de umidade produzidos do híbrido *E. camaldulensis* x *E. grandis* com sete anos de idade, e citaram um PCU de 2849,62 kcal/kg, valor próximo aos 2600,00 kcal/kg do tratamento 150 dias, que possui 35% de umidade e o maior valor de PCU.



**Figura 8.** Relação do poder calorífico útil (PCU) e do índice de valor combustível (IVC) com o tempo de secagem.

O coeficiente de determinação da regressão linear para o IVC é 0,8282, um valor que também representa alta aplicabilidade do modelo, porém de forma inferior se

comparado ao modelo para o PCU; isso é fácil de ser entendido pois, além do TU, o IVC também é influenciado pelo TC, já que a DB e o PCS são os mesmos para todos os tratamentos. Observa-se que de 90 para 120 dias de secagem a umidade diminuiu 16,90% e o IVC aumentou 10,30%, enquanto de 120 para 150 dias, apesar do TU ter diminuído apenas 12,52%, o IVC aumentou 80,30%. A explicação consiste no fato de que no primeiro caso o TC aumentou 8,83% e no segundo diminuiu 36,80%.

Embora o PCU seja um dos parâmetros de comparação mais utilizado pelo mercado de cavacos de madeira, o IVC se mostra mais eficiente uma vez que correlaciona demais fatores que influenciam na eficiência energética de um combustível lignocelulósicos. A ideal inicial assumida de modo geral é a de associar o potencial energético de uma biomassa com seu poder calorífico, por demonstrar o potencial de queima do material, mas o IVC permite uma avaliação mais criteriosa (MARQUEZ-REYNOSO et al., 2017). Ainda assim, o IVC não deve ser utilizado como o único parâmetro para avaliar a qualidade energética da biomassa, pois a equação é muito sensível à baixos valores de teor de umidade e de cinzas, tornando o índice impreciso em estudos em que há coeficiente de variação elevado (RAI; CHETTRI; SHARMA, 2002).

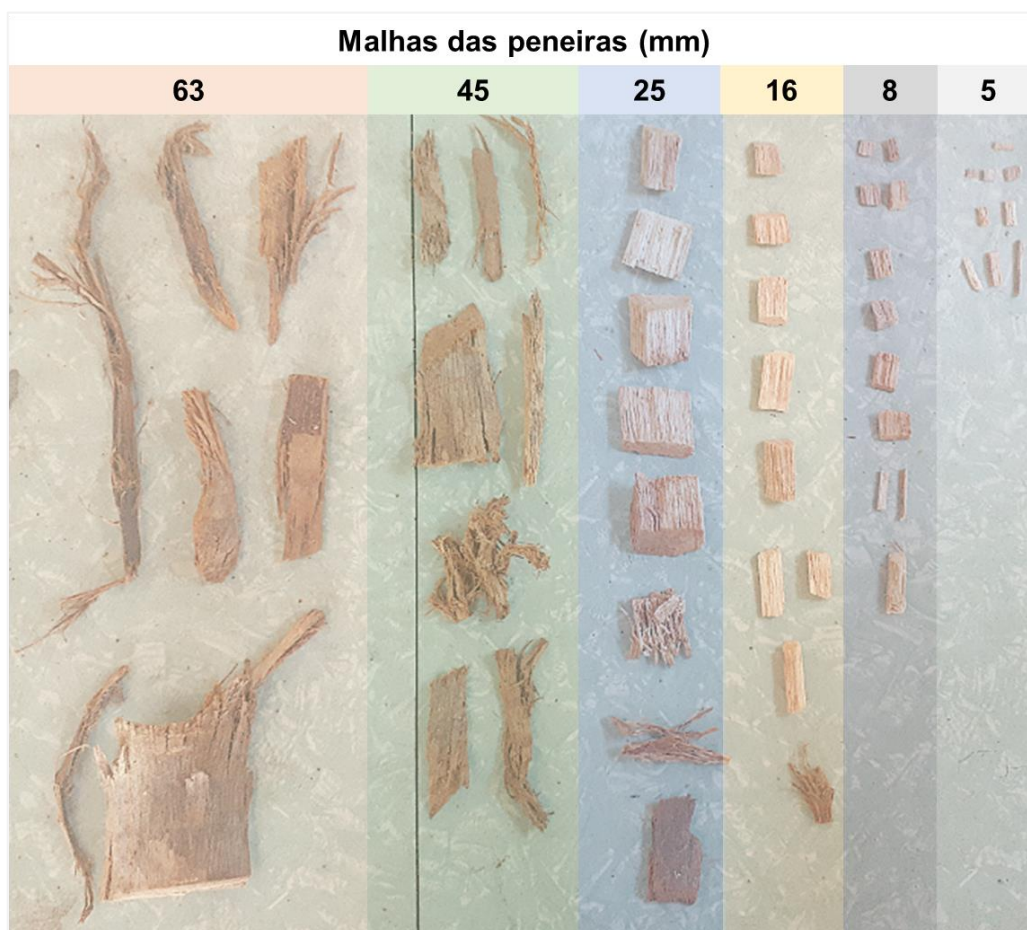
## **5.2 Caracterização física dos cavacos**

### **5.2.1 Granulometria dos cavacos**

Os tipos de partículas retidas em cada uma das peneiras do separador de partículas estão apresentados na Figura 9. Nas peneiras de malha 63 e 45 mm, 100% do material retido é representado por casca ou por grandes partículas de madeira com casca que passou pela peneira de retenção do picador. Esse fator pode ser corrigido com a diminuição da malha da peneira de retenção e/ou com o aumento de manutenções preventivas e corretivas dessa parte do picador pois, com a constante força do impacto das partículas sendo lançadas sobre ela, a peça pode se desgastar ou quebrar.

Nas peneiras de 25 e 16 mm houveram presença de casca e madeira com aspecto de material mastigado, que provavelmente foram formadas por terem ficado presas por um período entre a parede do picador e as lâminas durante a rotação das facas; entretanto, as quantidades desses materiais não foram significativas. Já nas peneiras de 8 e 5 mm, 100% do material retido foi madeira. Quanto à forma dos cavacos, na peneira

de malha 25 mm observou-se materiais mais homogêneos e na de malha 5 mm os mais heterogêneos.



**Figura 9.** Tipos de cavacos retidos em cada peneira do separador de partículas.

A Tabela 4 apresenta os valores médios dos percentuais de material retido em cada peneira para cada tratamento estudado. A Lippel (2014) estabelece que a fração de finos é representada por partículas inferiores a 3,15 mm e que esta não deve ultrapassar a 5% do peso total. Apesar de se ter adotado para este trabalho que a fração de finos seria representada por partículas de tamanho inferiores a 5 mm, aumentando a margem dessa fração, nenhum dos tratamentos obteve mais do que 5% de finos. Estes valores também estão de acordo com o máximo de finos estabelecido pelas normas europeia (12%) e canadense (10-15%), revelando um caráter mais rigoroso da classificação da Lippel (2014).

Para a Lippel (2014), a fração principal é composta pela somatória acumulativa dos percentuais das peneiras que compõem partículas maiores de 3,15 mm até um tamanho “Y” em que a soma dê um valor igual ou superior a 80%, sendo “Y” a granulometria dita como a principal. Realizou-se o procedimento descrito considerando

no tamanho mínimo partículas maiores que 5 mm, estando descrita na Tabela 5 a granulometria principal de cada tratamento. A norma europeia considera uma soma acumulada de 75% e a canadense de 60%.

**Tabela 4.** Percentuais de cavacos de *E. dunnii* retidos nas diferentes malhas do separador de partículas.

Tratamentos		Percentual de cavacos retidos na malha (%)							Somatório
(AP)	(TS)	63	45	25	16	8	5	5>	
4 Facas + 1 Calço	150	0,27	2,58	17,82	40,59	34,40	1,63	2,71	100
	120	0,00	0,90	7,66	24,46	52,12	10,08	4,79	100
	90	0,00	0,23	9,35	28,00	52,90	6,34	3,19	100
4 Facas	150	1,58	3,32	16,41	38,88	35,91	1,74	2,16	100
	120	1,13	0,85	29,00	37,27	26,65	2,02	3,08	100
	90	2,68	3,41	8,33	25,35	50,90	5,67	3,66	100
8 Facas + 1 Calço	150	0,00	0,98	5,68	30,07	54,92	5,09	3,25	100
	120	0,00	0,52	2,47	15,32	61,64	16,76	3,29	100
	90	0,00	2,38	9,37	34,74	47,23	3,23	3,05	100

Em que: AP – Ajuste do picador; TS – Tempo de secagem em dias; e tamanho das malhas em mm.

Os diferentes ajustes do picador proporcionaram granulometrias diferentes entre os cavacos com um mesmo período de secagem. Considerando um mesmo ajuste do picador, não houve diferença de granulometria para os períodos diferentes de secagem, pois não houve variação da umidade para abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), com exceção do tratamento 150 dias de secagem e picador com 4 facas +1 calço (150 4F+1).

**Tabela 5.** Dimensões da granulometria principal dos cavacos (mm) resultantes da relação tempo de secagem das árvores em campo vs ajuste de facas do picador.

		Tempo de secagem das árvores em campo (dias)		
		150	120	90
Ajuste de facas do picador	4 Facas + 1 Calço	25	16	16
	4 Facas	25	25	25
	8 Facas + 1 Calço	16	16	16

Por mais que haja uma separação teórica que delimita as faixas de umidade em que ocorre a liberação das águas livre e de impregnação, na prática, nas condições próximas ao PSF existe a movimentação de ambas as águas. O PSF ocorre em uma faixa teórica de umidade, que varia de 27 a 32%, sendo que diversos aspectos

anatômicos e tecnológicos interferem na umidade exata do PSF em uma madeira, como permeabilidade, espessura e frequência de vasos e, no caso dos eucaliptos, a impregnação dos tilos.

O tratamento 150 dias de secagem com 4 facas + 1 calço no picador (150 4F+1) apresentou umidade igual a 34,19%; uma hipótese seria a madeira já ter atingido o PSF e, assim, ter alcançado maior resistência mecânica, uma vez que a granulometria principal foi maior em relação aos demais tratamentos com mesmo ajuste do picador. É possível perceber na Figura 10 que esse foi o tratamento com o segundo menor teor de *over* e de finos, reforçando mais uma vez a questão da resistência mecânica. Porém, a resistência mecânica pode ter sido influenciada por outros fatores que não sejam o PSF, o que só pode ser testado mediante a análises mais específicas e aprofundadas do material. Além do mais, deve-se ainda considerar um suposto erro experimental.

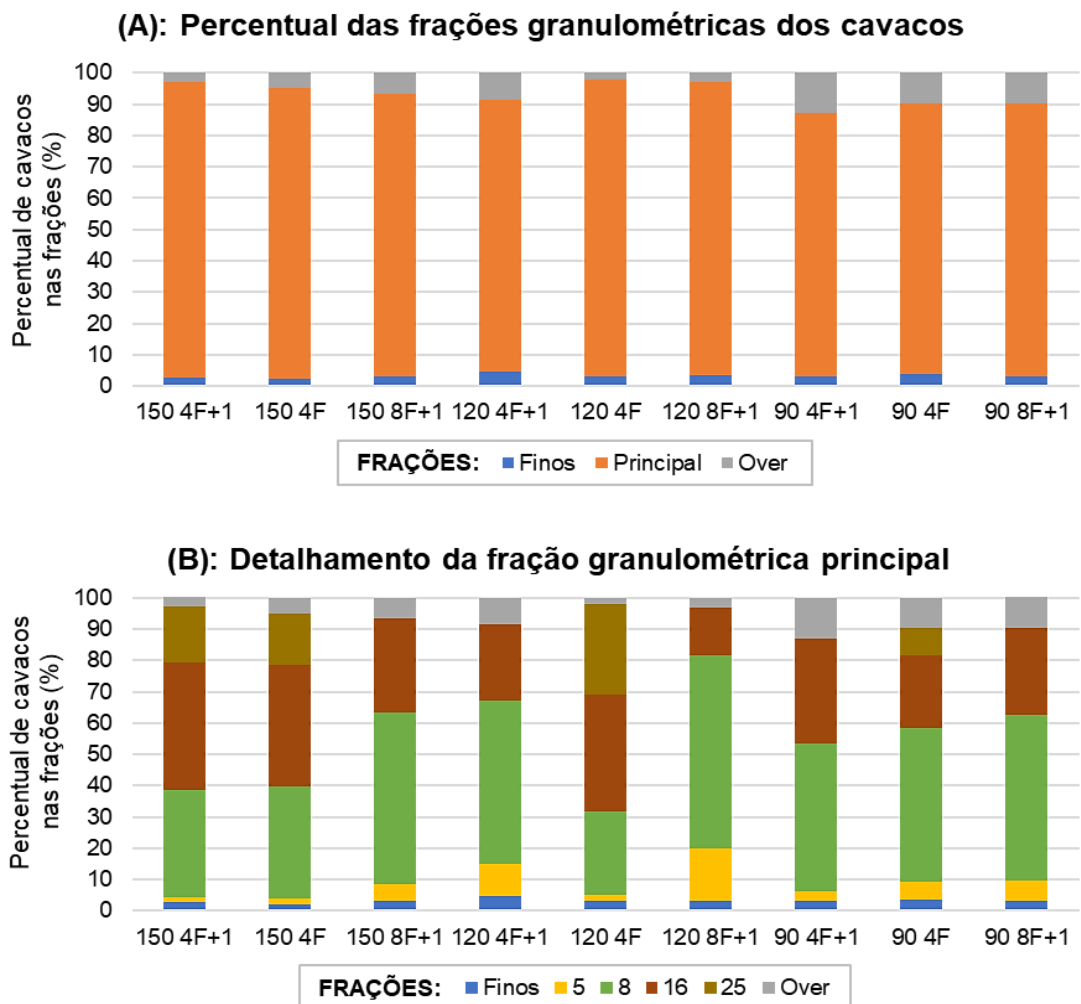
Se tratando da fração de *over*, a Lippel (2014) cita que a fração não deve ultrapassar a 1%, demonstrando mais uma vez rigorosidade em relação às normas europeia e canadense, que estabelecem 3-6% e 6-10%, respectivamente. Nenhum dos tratamentos atendeu a especificação da Lippel (2014) para a fração de *over*, os tratamentos 150 4F+1, 150 4F, 120 4F e 120 8F+1 atendem as especificações da norma europeia, e apenas o tratamento 90 4F+1 está aquém de todas as normas.

A representação de todas as frações para cada tratamento está visível na Figura 10. O tratamento 120 dias de secagem e picador com 4 facas (120 4F) é o que apresentou maior fração principal e menores frações de *over* e finos. Todavia, se analisarmos o detalhamento da fração principal, veremos que tal tratamento é consideravelmente heterogêneo. Nesse ponto de vista, o tratamento 120 dias de secagem e picador com 8 facas + 1 calço (120 8F+1) é mais homogêneo e não possui grandes diferenças em relação aos percentuais das frações principal, *over* e finos.

De modo geral, os tratamentos com 90 dias de secagem apresentaram os piores percentuais, sendo o tratamento 90 dias de secagem e picador com 4 facas + 1 calço (90 4F+1) o pior – com mais de 12% de *over* e apenas 84% de fração principal. Percebe-se então que a umidade mais elevada desses tratamentos influenciou negativamente na qualidade dos cavacos quanto a sua granulometria. Já a influência do ajuste do picador está no número de facas que, quanto maior, menores são as partículas geradas e, conseqüentemente, menor a granulometria.

É interessante ressaltar que, mesmo a Lippel (2014) delimitando que a granulometria dos cavacos deva ser denominada em função da classe granulométrica em que a soma acumulada foi igual ou superior a 80%, para todos os tratamentos, o

tamanho de partículas de maior representatividade não é o mesmo da classe granulométrica dita como a principal. Apesar de considerarem diferentes percentuais para a fração principal, as normas europeia (75%) e canadense (60%) também utilizam desse método de classificação. Kofman (2006) questionou tal método afirmando que este não considera um espectro correto de tamanho de cavacos, defendendo a ideia de uma reformulação nas normas. Hartmann e outros (2006) afirmam que a análise do tamanho das partículas de cavacos de madeira é uma tarefa difícil, podendo se tornar imprecisa quando tenta-se aplicar muitos princípios em conjunto. Isso nos leva ao questionamento a respeito de uma nova metodologia de classificação para granulometria de cavacos que seja mais precisa e pontual.

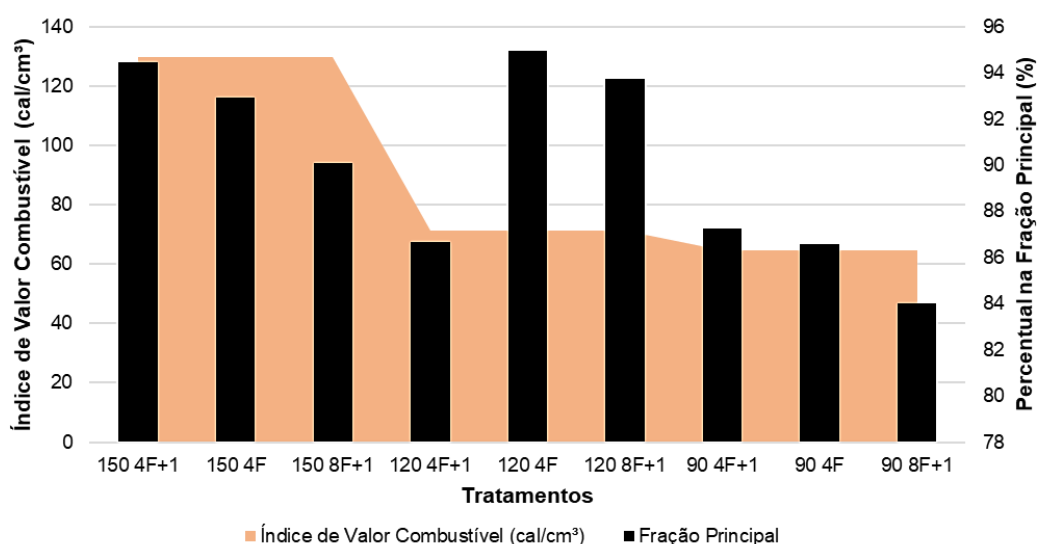


**Figura 10.** (A) Distribuições das frações over, principal e finos dos cavacos em cada tratamento, e (B) Distribuições das frações over, principal e finos dos cavacos em cada tratamento, com detalhamento da fração principal. Tratamento os números 90, 120 e 150 são referentes aos tempos de secagem (dias) e as siglas posteriores aos números representam os ajustes do picador, sendo: 4F – 4 facas, 4F+1 – 4 facas + 1 calço e 8F+1 – 8 facas + 1 calço.



Independente de qual seria a granulometria real dos cavacos estudados, pode-se relacionar seus tamanhos de partículas com uma possível utilização ideal, conforme classificado por Kofman (2006): No âmbito geral, todos os tratamentos atendem a necessidade de queimadores de médio porte, com indigência energética de 250 kW a 1 MW. Contudo, cavacos com granulometria de 16 mm são mais eficientes se utilizados em queimadores de pequeno porte, que demandem de até 250 kW de energia, desde que não haja grandes percentuais de partículas *over*, como é o caso do tratamento 120 dias de secagem com 8 facas +1 calço (120 8F+1). Já cavacos com granulometria de 25 mm são mais eficientes em queimadores de grande porte, que necessitam de mais do que 1 MW, desde que a maioria de seus cavacos sejam de 25 mm, o que não ocorre em nenhum dos tratamentos.

Apesar do estudo da granulometria proporcionar aplicações mais eficientes para os cavacos, é importante analisar concomitantemente as características energéticas do material. A Figura 11 mostra a relação entre o IVC e a granulometria.



**Figura 11.** Percentual de cavacos na fração principal e índice de valor combustível dos tratamentos. Nos tratamentos os números 90, 120 e 150 são referentes aos tempos de secagem (dias) das árvores em campo e as siglas posteriores aos números representam os ajustes de facas do picador, sendo: 4F – 4 facas, 4F+1 – 4 facas + 1 calço e 8F+1 – 8 facas + 1 calço.

Percebe-se que os tratamentos 120 dias de secagem com 4 facas e com 8 facas + 1 calço (120 4F e 120 8F+1), destacados na análise de granulometria, possuem uma grande diferença no índice de valor combustível (IVC) em relação aos tratamentos com 150 dias de secagem, demonstrando que a qualidade dos cavacos não deve ser tomada por apenas um parâmetro de classificação. Outro fator que corrobora essa afirmativa

pode ser observado com o tratamento 150 dias de secagem com 8 facas + 1 calço (150 8F+1), que possui alto IVC porém apresenta o pior desempenho na análise granulométrica em relação aos demais tratamentos com mesmo IVC.

Considerando a combinação dos parâmetros IVC e percentual de material retido na fração principal, o tratamento 150 dias de secagem com 4 facas + 1 calço (150 4F+1) mostrou-se o melhor por possuir o maior percentual de material na fração principal entre os tratamentos de maior IVC, assim como de modo inverso o tratamento 90 dias de secagem com 8 facas + 1 calço (90 8F+1) apresenta-se como o pior.

### 5.2.2 Densidade a granel dos cavacos

A análise de densidade a granel (DG) foi realizada em experimento fatorial visando verificar a influência da relação tempo de secagem vs ajuste do picador, havendo interação entre os fatores. Os resultados estão dispostos na tabela 6.

**Tabela 6.** Densidade a granel ( $\text{g/cm}^3$ ) dos cavacos de *E. dunnii* resultantes da relação tempo de secagem das árvores em campos vs ajuste de facas do picador.

		Tempo de secagem das árvores em campo (dias)		
		150	120	90
Ajuste de facas do picador	4 Facas + 1 Calço	0,339 Bb	0,294 Aa	0,346 Ba
	4 Facas	0,310 Aa	0,304 Aa	0,342 Ba
	8 Facas + 1 Calço	0,348 Ab	0,354 Ab	0,376 Bb

Em que: médias seguidas de uma mesma letra maiúscula para fatores de uma mesma linha e minúscula para fatores e uma mesma coluna, não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O tempo de secagem das árvores em campo está diretamente relacionado com a umidade, que influencia no peso do material uma vez que quanto mais água estiver presente, mais pesado estará e, conseqüentemente, maior será a densidade a granel. Souza e colaboradores (2002) relatam que o aumento da umidade ocasiona o inchamento do material, o que resultaria no maior preenchimento da carga, diminuindo a densidade a granel; porém, variações dimensionais ocasionadas pela higroscopia da madeira só ocorrem quando há variações de umidade entre 0-32%, conjuntura em que a água em movimentação é a de impregnação localizada nas paredes celulares das fibras, situação que não ocorreu neste estudo.

Já o ajuste do picador irá influenciar na granulometria dos cavacos. Quanto menor a granulometria, maior é o espaço preenchido da caixa ou da carga, acarretando em maior massa, e por conseguinte uma maior densidade a granel. Entretanto, a presença

de partículas de diferentes tamanhos na carga pode ser um fator interessante para a questão de acomodação do material e transporte uma vez partículas menores se acomodam nos espaços vazios entre as partículas maiores, cooperando para o aumento da densidade a granel (SOUZA et al., 2002). O que não tem o mesmo valor se considerarmos a eficiência da combustão na caldeira, que está atrelada a homogeneidade das partículas quanto ao seu tamanho (GRUNKRAUT, 2012).

O cavaco com maior densidade a granel foi o 90 dias de secagem com 8 facas+1 calço (90 8F+1 – 0,376 g/cm<sup>3</sup>). Contudo, é um dos tratamentos de maior umidade, o que não é interessante do ponto de vista energético pela redução do PCU e do IVC que é ocasionada. Este tratamento também apresentou o menor percentual de material na fração principal, ou seja, o tratamento mais heterogêneo em relação à tamanho de partículas, o que confirma a ideia de que a heterogeneidade de tamanhos proporciona uma melhor acomodação da carga e, assim, maior valor de DG.

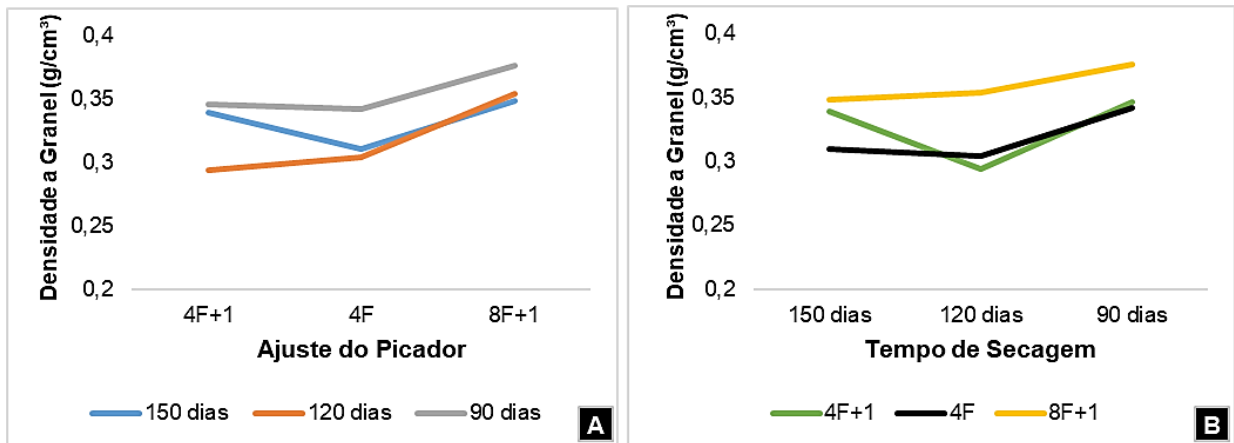
O menor valor de DG ocorreu no tratamento 120 dias de secagem com 4 facas + 1 calço (120 4F+1 – 0,294 g/cm<sup>3</sup>). Este tratamento possui granulometria 16 mm e o segundo menor percentual de material retido na fração principal (segunda maior heterogeneidade), o que teoricamente deveria propiciar maiores acomodações da carga e DG, o que não ocorreu.

O comportamento da DG é diferente quando se avalia os fatores isoladamente, conforme apresentado na Figura 12. Ao analisar a variação da DG de um material com mesmo tempo de secagem submetido à diferentes ajustes do picador (Figura 12-A), percebe-se que (a) o ajuste 8 facas + 1 calço é o que proporciona a maior DG, uma vez que proporciona uma granulometria menor (16 mm), e que (b) cada tempo de secagem teve variações de proporções diferentes.

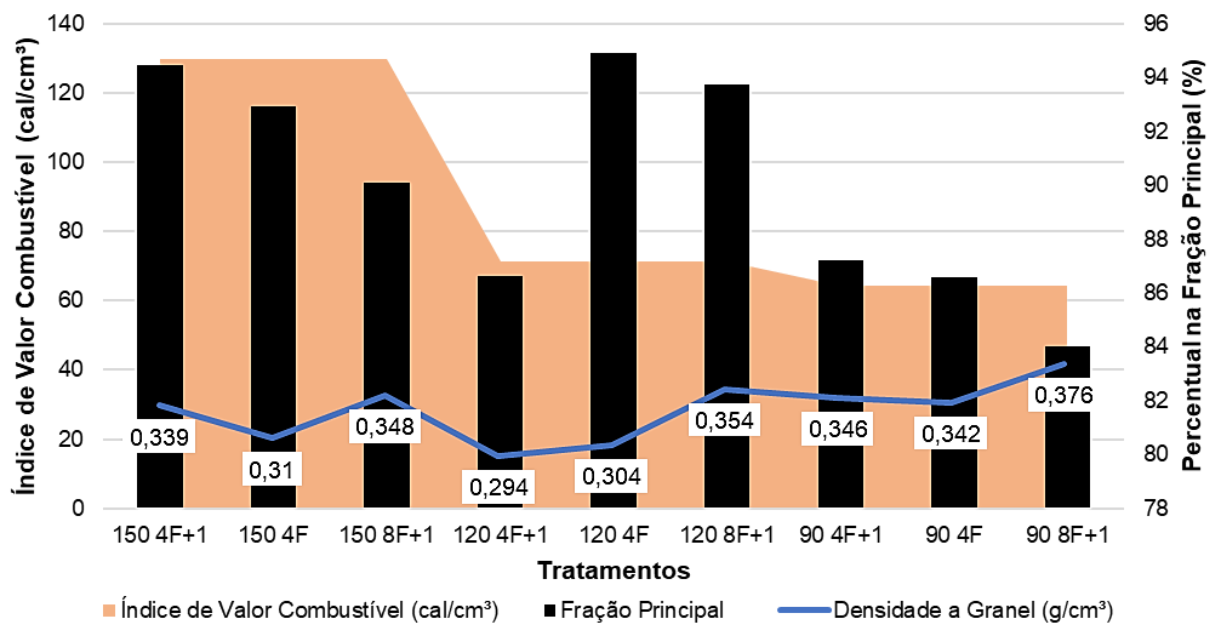
Já com a análise da variação da DG dos cavacos oriundos de um mesmo ajuste de picador porém com tempos de secagem diferentes (Figura 12-B), nota-se que, mesmo que em proporções diferentes, o padrão de comportamento foi semelhante, com o tempo de 120 dias proporcionando as menores DB. É difícil determinar o motivo exato desta variação sem uma análise mais aprofundada dos cavacos, como a verificação das propriedades mecânicas do material e as variações na geometria das partículas.

Como já supracitado, é preciso que os diversos parâmetros de avaliação de um produto sejam estudados em conjunto para estabelecer-se a qualidade do mesmo. Na Figura 13 está exposta a análise conjugada da DG e os parâmetros IVC e percentual de material que compõe a fração granulométrica principal dos cavacos de cada tratamento,

e é possível perceber que, de modo semelhante, o alto desempenho de um tratamento em uma determinada análise não garante o mesmo resultado em uma outra.



**Figura 12.** Comportamento da densidade a granel para A- mesmos tempos de secagem e variando-se o ajuste do picador e B- mesmos ajustes de facas do picador e variando-se o tempo de secagem. Em que: 4F – quatro facas, 8F – oito facas, +1 – mais um calço e os dias são referentes ao tempo de secagem das árvores em campo.



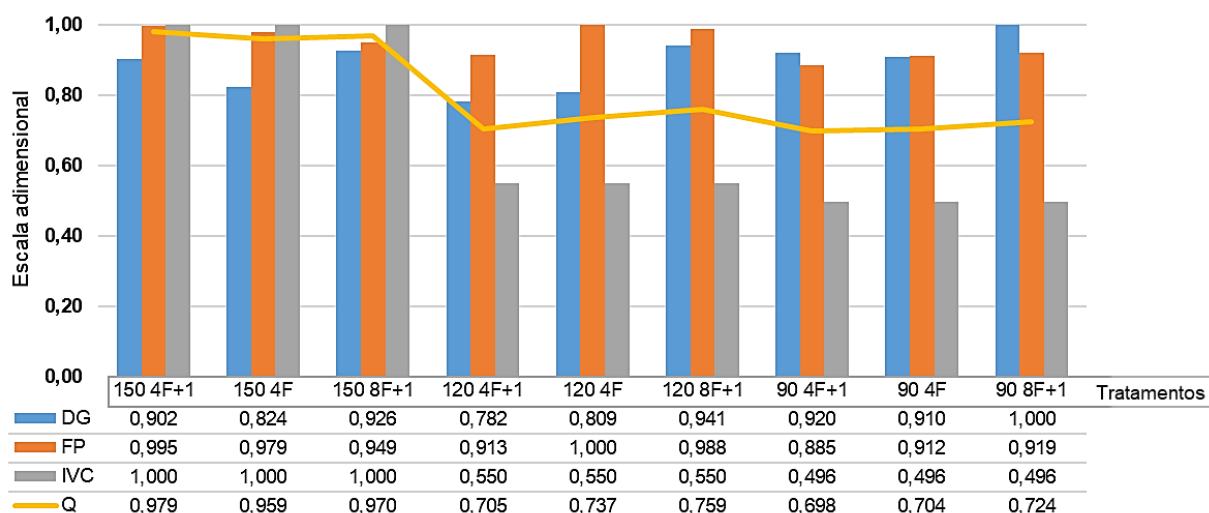
**Figura 13.** Densidade a granel, percentual de cavacos na fração principal e índice de valor combustível dos tratamentos. Nos tratamentos os números 90, 120 e 150 são referentes aos tempos de secagem (dias) das árvores em campo e as siglas posteriores aos números representam os ajustes de facas do picador, sendo: 4F – 4 facas, 4F+1 – 4 facas + 1 calço e 8F+1 – 8 facas + 1 calço.

O tratamento 150 dias de secagem com 4 facas (150 4F) que seria o segundo melhor na comparação envolvendo o IVC e o percentual da fração principal, possui o terceiro pior desempenho na análise de DG (0,310 g/cm³). Nesta mesma comparação, o tratamento 90 dias de secagem com 8 facas +1 calço (90 8F+1) que foi apontado como

o pior, possui a maior DG (0,376 g/cm<sup>3</sup>). Assim como o tratamento 120 dias de secagem com 8 facas + 1 calço (120 8F+1) que é o segundo melhor em relação à DG (0,354 g/cm<sup>3</sup>) e possui o terceiro maior percentual de fração principal (93,72%), apresenta um IVC intermediário.

### 5.3 Qualidade energética dos cavacos de madeira

O valor resultante da equação de índice de qualidade energética dos cavacos (Q) proposta na equação 9 para se estabelecer um parâmetro de comparação é um número entre 0 e 1 adimensional, em que quanto mais próximo de 1 melhor é a qualidade dos cavacos. Os resultados estão expostos na Figura 14 e os tratamentos ranqueados estão na tabela 7.



**Figura 14.** Índice de qualidade energética dos cavacos de *E. dunnii*. Em que: DG – Densidade a granel, FP – Percentual de cavacos retidos na fração granulométrica principal, IVC – Índice de valor combustível e Q – Índice de qualidade energética dos cavacos. Todos os valores são adimensionais. Nos tratamentos os números 90, 120 e 150 são referentes aos tempos de secagem (dias) das árvores em campo e as siglas posteriores aos números representam os ajustes de facas do picador, sendo: 4F – 4 facas, 4F+1 – 4 facas + 1 calço e 8F+1 – 8 facas + 1 calço.

Confirmando as análises individuais de cada parâmetro estudado, o tratamento 150 dias de secagem com 4 facas + 1 calço no picador (150 4F+1) se mostrou o melhor, com Q igual a 0,979. Entretanto, o com 90 dias e 8 facas + 1 calço (90 8F+1), que aparentava ser o pior, se mostrou superior a três tratamentos, sendo o 6<sup>o</sup> melhor.

Os três melhores Q's no ranking geral foram dos tratamentos com 150 dias de secagem, confirmando a importância dos baixos teores de umidade na qualidade dos

cavacos de madeira para energia. É importante ressaltar que a umidade sofre influência das condições climáticas da época em que ocorre os períodos de secagem; assim, se a colheita é realizada em períodos mais chuvosos é interessante aumentar o tempo de secagem, de modo inverso nos períodos mais secos. Esse fato demonstra a importância de realizar-se a repetição deste estudo em diversos períodos do ano.

**Tabela 7.** Rankings da qualidade energética dos cavacos de *E. dunnii*. A- Ranking geral e B- Ranking separado por classe de granulometria.

A- Ranking Geral dos Cavacos			B- Ranking por Granulometria		
Tratamento	Q	Colocação	Tratamento	Q	Colocação
150 4F+1	0,979	1º	<b>Granulometria com 25 mm</b>		
150 8F+1	0,970	2º	150 4F+1	0,979	1º
150 4F	0,959	3º	150 4F	0,959	2º
120 8F+1	0,759	4º	120 4F	0,737	3º
120 4F	0,737	5º	90 4F	0,704	4º
90 8F+1	0,724	6º	<b>Granulometria com 16 mm</b>		
120 4F+1	0,705	7º	150 8F+1	0,970	1º
90 4F	0,704	8º	120 8F+1	0,759	2º
90 4F+1	0,698	9º	90 8F+1	0,724	3º
			120 4F+1	0,705	4º
			90 4F+1	0,698	5º

Em que: Q é o índice de qualidade energética dos cavacos em valores adimensionais de 0 a 1, sendo os valores mais próximos de 1 os melhor. Nos tratamentos os números 90, 120 e 150 são referentes aos tempos de secagem (dias) das árvores em campo e as siglas posteriores aos números representam os ajustes de facas do picador, sendo: 4F – 4 facas, 4F+1 – 4 facas + 1 calço e 8F+1 – 8 facas + 1 calço.

A discrepância dos cavacos com 120 dias de secagem e com 4 facas mais 1 calço no picador (120 4F+1) em relação aos demais tratamentos com 120 dias de secagem foi confirmada com o Q de 0,705, sendo o terceiro pior no âmbito geral e o segundo pior para sua granulometria específica. Apesar de não ter sido encontrada uma resposta para o desempenho inesperado do 120 4F+1, os resultados são de grande importância pois são fatores essenciais nas tomadas de decisões do processo produtivo.

Quando não é possível a utilização de materiais com 150 dias de secagem, a cooperativa, em geral, opta por utilizar o material com 120 dias, que possui umidade dentro do limite aceitável pelo mercado, porém sempre com o ajuste de 4 facas + 1 calço no picador (4F+1) no picador. O resultado nos mostra que essa medida produz cavacos com qualidades bem diferentes: primeiramente que a granulometria do padrão (150 4F+1) é 25 mm e a do 120 4F+1 é 16 mm, e segundo que o Q cai de 0,979 para 0,705. A medida mais correta nesta situação seria alterar o ajuste do picador para 4F, que produziria um cavaco de mesma granulometria e com o melhor Q possível.

## 6. CONCLUSÕES

- O tempo de secagem das árvores em campo influenciou a umidade da madeira, que tende a diminuir com o decorrer do tempo. O teor de cinzas foi influenciado pelo tempo de secagem, no entanto, não apresentou padrão comportamental.
- O poder calorífico útil e o índice de valor combustível aumentaram com a diminuição da umidade, confirmando a premissa de que altos teores de umidade influenciam negativamente a eficiência energética do material.
- O índice de valor combustível é mais eficiente na avaliação do potencial energético real da biomassa, uma vez que abrange um maior número de propriedades importantes para a combustão.
- A granulometria e a densidade a granel dos cavacos são afetadas pelo ajuste de facas do picador e pela umidade do material.
- A densidade a granel também sofre influência da granulometria do material.
- As variações ocasionadas na granulometria dos cavacos devido ao teor de umidade, revelaram a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre relação água-madeira, ponto de saturação das fibras e as interferências na resistência mecânica da madeira.
- O índice de qualidade proposto ajudou a compreender como fatores diversos precisam ser avaliados em conjunto na determinação da qualidade ideal dos cavacos de madeira para produção energética, apesar de ser específico para os cavacos estudados.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2002.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**: Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**. Carvão vegetal - ensaios físicos determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro, 1983.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal - determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.
- ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico da ABRAF - 2013**: Ano base 2012. 146 p. 2013.
- ABTCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Norma técnica M11/77**. São Paulo. 1997.
- ALTAFINI, C. R. **Caldeiras**. Universidade de Caxias do Sul, 2002. Disponível em: <http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/caldeirasapostila.pdf>. Acesso em 01 set. 2018.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2002.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatórios ANEEL**. 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/relatorios>. Acesso em: 24 fev. 2018.
- ARRUDA, M. Z. **Análise de combustíveis de caldeiras**. 2009. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2009.
- BARCELLOS, D. C. *et al.* O estado-da-arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa e Energia**. 2005, v.12, n. 2, p. 141-158.
- BARCELLOS, D. C., **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa- MG, 2007.
- BARRICHELO, L.E.G. *et al.* **Aproveitamento industrial para a produção de celulose de madeiras de eucaliptos adaptados à regiões susceptíveis à geadas**. Piracicaba: IPEF, 1976.



BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2ª ed. Florianópolis: UFSC, 1995.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Área de Setores Produtivos 33. **Papel e celulose**. Brasília, p. 261-314, 2011.

BOTELHO, M. H. C.; BIFANO, H. M. **Operação de caldeiras**: Gerenciamento, controle e manutenção. São Paulo: Blucher, 2011.

BRAND, M. A. *et al.* Influência da época de estocagem na qualidade da biomassa florestal para a geração de energia. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 369-380, 2012.

BRAND, M. A. Influência da espécie na qualidade da biomassa florestal sob estocagem, para geração de energia. **Ambiência**, Guarapuava, v. 9, n. 3, p. 461-474, 2013.

BRAND, M.A. **Energia de biomassa florestal**, 1ª ed, Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRAND, M.A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. 2007. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BRANT, P. Uma reflexão sobre competitividade do setor de papel e celulose. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL DA INDÚSTRIA DE BASE FLORESTAL E DE GERAÇÃO DE ENERGIA. 6., 2012, Vitória. **Madeira 2012...** Vitória, 2012. p. 54-55.

BRITO, J. O. Madeira para a floresta: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. **Silvicultura**, v. 11, n. 41, p. 188-193, 1986.

BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Circular Técnica 181. Piracicaba: IPEF, 1993.

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CERAGIOLI, N. S. **Qualidade de cavacos produzidos em sistemas florestais de curta rotação de eucalipto para fins energéticos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Botucatu, 2013.

CERATTO, W. F.; FARIA, R. H. S. **Estudo da cogeração em uma indústria de beneficiamento de madeira**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

CONTIERO, M. I.; MAGOSSI, D. C. Comparação do poder calorífico da madeira de *Eucalyptus dunnii maiden* (myrtaceae) e do híbrido *Eucalyptus urograndis* (myrtaceae). **União Latino-americana de Tecnologia**, Jaguariaíva, n. 4, p. 34-48, 2016.

CORTEZ, C. L. *et al.* Análise do processo produtivo do eucalipto no sistema “short rotation” para o uso como combustível em uma usina termelétrica. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIONERGIA, 4, 2009, Curitiba. **Anais...** São Paulo: Centro Nacional de Referência em Biomassa, 7 p.

COTTA, A. M. G. **Qualidade do carvão vegetal para siderurgia**. 1996. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa -MG, 1996.

COUTO, L.; MÜLLER, M.D. Florestas energéticas no Brasil. *In*: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; E.O. GÓMEZ. **Biomassa para energia**. São Paulo: UNICAMP, 2008. Cap. 4, p. 93-111.

CSA – CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CAN/CSA-ISO 17225**: Solid Biofuels Standards for Forest Biomass. 2015.

ECS – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EM 1496**: classification and specification for solid biofuels. 2010.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional de 2018**: ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood**: chemistry, ultrastructure, reactions. New York: Walter de Gruyter, 1984.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário da língua portuguesa**. 5. ed. Curitiba: Positivo, 2010.

FERREIRA, T. S. *et al.* Influência do teor de umidade no poder calorífico em diferentes idades e componentes de árvores de *Pinus taeda*. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE FLORESTAS ENERGÉTICAS, 1., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Disponível em:  
<http://www.solumad.com.br/artigos/Influencia%20do%20teor%20de%20umidade%20no%20poder%20calorifico%20em%20diferentes%20idades%20e%20componenes%20de%20Pinus%20taed.pdf>. Acesso em 13 out. 2018.

FOELKEL, C. E. B. **Classificação da densidade básica da madeira de Eucaliptos**. Grau Celsius, 2019. Disponível em:  
[http://www.eucalyptus.com.br/eucaexpert/1037\\_Classificacao%20madeiras%20eucalipto%20pela%20densidade.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaexpert/1037_Classificacao%20madeiras%20eucalipto%20pela%20densidade.pdf). Acesso em: 01 fev. 2019.

FOELKEL, C. E. B. **O processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo licor Kraft de cozimento**. Grau Celsius, 2009. Disponível em:  
[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT15\\_ImpregnaçãoCavacos.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT15_ImpregnaçãoCavacos.pdf). Acesso em: 28 abr. 2018.

FREDDO, A. **Elementos minerais em madeira de eucaliptos e acácia negra e sua influência na indústria de celulose Kraft branqueada**. 1997. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1997.

FUNDAÇÃO ABC. **Sistema de monitoramento agrometeorológico**. 2018. Disponível em: <http://sma.fundacaoabc.org/monitoramento>. Acesso em: 31 jan. 2019.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1988.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. *In*: Forest Products Laboratory. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison: USDA, 2010. p. 4.1-5.19.

GRUNKRAUT, M. **Cavacos**. Coopermiti, 2012. Disponível em: <http://www.coopermiti.com.br/educacao/cavaco.pdf>. Acesso em: 15 dez 2018.

HARTMANN, H. *et al.* Methods for size classification of wood chips. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 30, p. 944-953, 2006.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório dos indicadores de desempenho do setor nacional de árvores plantadas - 2017**: Ano base 2016. Disponível em: [http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf). Acesso em: 29 ago. 2018.

IPEF – INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. **Relatório anual 2017**: ano base 2016. Disponível em: [https://www.ipef.br/publicacoes/relatorio\\_anual/relatorio\\_anual\\_2017.pdf](https://www.ipef.br/publicacoes/relatorio_anual/relatorio_anual_2017.pdf). Acesso em: 02 out. 2018.

JANKOWSKY, I. P. **Fundamentos da secagem de madeiras**. Piracicaba: Documentos Florestais, 1990. Disponível em: <http://www.ltpf.ufra.edu.br/sec.htm>. Acesso em: 29 set. 2018.

KOFMAN, P. D. Quality wood chip fuel. **COFORD**, Dublin, ano 2006, n. 6, p. 1-4, 2006.

KOLLMANN, F.P.T.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. **Principles of wood science and technology II: wood based materials**. 2. ed. v. 2. Berlin: Springer-Verlag, 1975.

KRETSCHMANN, D. Mechanical properties of wood. *In*: Forest Products Laboratory. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: USDA, 2010. p. 5.1-5.46.

LEITE, N. R.; MILITÃO, R. A. **Tipos e aplicações de caldeiras: fabricação e montagem de caldeiras e trocadores de calor**. Escola Politécnica EPUSP-PROMIMP, 2008. Disponível em [http://lcsimej.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras\\_prominp.pdf](http://lcsimej.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras_prominp.pdf). Acesso em 02 set. 2018.

LIPPEL. **Cavacos de madeira**. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/br/sustentabilidade/cavacos-de-madeira#.V0He8VQrI1J>. Acesso em: 18 maio 2018.

LOPES, R. P. *et al.* Controle da combustão em fornalhas a lenha. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2003, Campinas. **Anais...** [...]. 2003. p. 1-9.

MACEDO, I.C. **Estado da arte e tendências das tecnologias para energia**. Brasília: CGEE, 2003.

MACHADO, C. C. O setor florestal brasileiro. *In*: MACHADO, C.C. **Colheita Florestal**. 3 ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014.

MALINOVSKI, R. A. *et al.* Otimização da distância de extração de madeira com forwarder. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 171-179, 2008.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Plano nacional de agroenergia 2006 – 2011**, 2ª ed., Embrapa Informações Tecnológicas, Brasília, 2006. 110 p.

MARQUEZ-REYNOSO, M. I. *et al.* Purpose, preferences and fuel value index of trees used for firewood in El Ocote Biosphere Reserve, Chiapas, Mexico. **Biomass and Bioenergy**, p. 1-9, 2017.

MELLO, A. L. **Principais causas em acidentes com caldeiras**. 2010. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Centro Universitário do Maranhão, São Luiz, 2010.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Acordo de Paris**. [2017?]. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em: 2 fev. 2019.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **PROINFA**. 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa>. Acesso em: 12 nov. 2018.

MOERS, E. M. *et al.* Caracterização da biomassa residual proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia. In: Congresso Latino Americano de Suinocultura e Sustentabilidade Ambiental, 1, 2011, Foz do Iguaçu, **Anais...** Foz do Iguaçu: COLASSA, 11 p.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; LIMA, E. A.; GOULART, I. C. G. R. **Comunicado técnico 293**: Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha. Colombo: Embrapa, 2012.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. 3. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010.

MORITA, S. **Energia renovável para o Brasil – eletrificação rural neutra em carbono**. Disponível em: <http://www.bizpoint.com.br/jp/reports/morita/030227.htm>. Acesso em: 30 jun. 2018.

NASCIMENTO, M. D. ; BIAGGIONI, M. A. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria Seropédica. **Energia na agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 104-117, 2010.

NOGUEIRA, L. A. H. *et al.* **Dendrologia**: fundamentos e aplicações. Brasília: ANEEL, 2000.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **The pellet handbook**: The production and thermal utilization of pellets. London: Earthscan, 2010.

PADILHA, V. W. **A capacidade inovadora e as estratégias competitivas das empresas do setor madeireiro**: um estudo da indústria de painéis de Guarapuava-PR. 2009. 76f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

PARHAM, R. A. Wood defects. In: KOCUREK, M. J.; STEVENS, C. F. B. (Ed.). **Pulp and paper manufacture**. 3rd. ed. Montreal: Canadian Pulp and Paper Association, 1983. p. 66-79.

PERA, H. **Geradores de vapores**. Editora Fama: São Paulo, 1990.

PEREIRA, J. C. D. *et al.* **Documentos 38**: características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: Embrapa, 2000.

- PESCADOR C.M.M. *et al.* Work safety in the forest harvesting: initial results. **Ambiência**, v. 9, n. 2, p. 397-410, 2013.
- PIMENTA, A.S.; BARCELLOS, D.C. **Como produzir carvão para churrasco**. Viçosa: UFV, 2000.
- PUROHIT, N.; NAUTIYAL, A. R. Fuelwood value index of indian mountain tree species. **International Tree Crops Journal**, 1987. p.177-182. Disponível em: [http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01435698.1987.9752821#.V0bv9\\_krLcs](http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01435698.1987.9752821#.V0bv9_krLcs) . Acesso em: 15 maio 2018.
- QUAAK, P.; KWOF, H.; STASSEN, H. **Energy from biomass**: a review of combustion and gasification technologies. World Bank Technical Paper #422. Washington D.C.: [s. n.], 1999.
- QUINTILHAN, M. T. *et al.* Caracterização de cavacos de um clone de eucalipto com potencial energético em mato grosso. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, II., 2015, Belo Horizonte. **Anais... [...]**. 2015. p. 1-9.
- QUIRINO, W.F. *et al.* Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa e Energia**, Viçosa, v.1, n.2. p.173-182, 2004.
- RAI, Y. K.; CHETTRI, N.; SHARMA, E. Fuel wood value index of woody tree species from Mamlay Watershed in south Sikkim, India. **Forest, trees and livelihoods**, [S. l.], v. 12, p. 209-219, 2002.
- RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. **Combustão e gasificação de biomassa sólida**: Soluções Energéticas para a Amazônia. Brasília: MME, 2008.
- RIBEIRO, F.A.; FILHO, J. Z. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, v. 46, p. 76-85, 1993.
- ROBERT, R. C. G. Máquinas de colheita florestal. *In*: FIEDLER, N. C; OLIVEIRA, M. P. Motores e máquinas florestais. Alegre, ES: CAUFES, 2018. p. 237-276.
- RODRIGUES, C. K. **Colheita e transporte florestal**. Curitiba: [s.n.], 2018.
- SBARDELLA M. *et al.* Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus dunnii maiden* visando a produção de polpa celulósica. *In*: CONFLAT, VII., 2018, Vitória. **Anais... [...]**. 2018.
- SEIXAS, F. **Novas tecnologias no transporte rodoviário de madeira**. ESALQ-USP, 2008. Disponível em: <http://www.ipef.br/silvicultura/transporte.pdf>. Acesso: 12 set 2018.
- SEVERO, E. T. D. A secagem da madeira de eucalipto e seus desafios. *In*: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II. Vitória: Aquarius, 2007. p. 185-216.
- SHMULSKY, R.; JONES, P. D. Energy and Chemical Products. *In*: SHMULSKY, R.; JONES, P. D. **Forest products and wood science**: an introduction. 6. ed. Blackwell: Wiley, 2011. cap. 16, p. 421-442.

SILVA, J. C. de., OLIVEIRA, J. T. S. da. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Árvore**, Viçosa, v. 27, 2003.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: USDA. Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991.

SOUZA, M. C. H. *et al.* Variação da densidade a granel de cavacos de *Eucalyptus saligna* em função das suas dimensões e da umidade. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 35., 2002, São Paulo. **Anais...** [...]. 2002.

SPELTZ, R.M., MONTEIRO, R.F.R. *E. dunnii* perspectivas de sua introdução no segundo planalto paranaense. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CELULOSE E PAPEL - SEMANA DO PAPEL, 15., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1982. 435 p. 5-19.

TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **T-257 om- 92**: sampling and preparing wood for analysis. Atlanta, 1992.

VALE, A. T. do., *et al.* Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* hill ex- maiden e *Acacia mangium* willd em diferente níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

VALVERDE, S. R. *et al.* **Silvicultura brasileira**: oportunidades e desafios da economia verde. 2012. Disponível em: <http://fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-549.pdf>. Acesso em: 12 set 2018.

WADOUSKI, L. H. Fatores determinantes da produtividade e dos custos na colheita de madeira. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 10, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, FUPEF, 1997. p. 77-84.