Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Aproveitamento de resíduos de colheita florestal para cogeração de energia em uma empresa localizada no estado do Paraná

João Maurício Pacheco

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Bioenergia

Piracicaba
2022

João Maurício Pacheco
Engenheiro Florestal

Aproveitamento de resíduos de colheita florestal para cogeração de energia em uma empresa localizada no estado do Paraná

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:
Profa. Dra. **SUANI TEIXEIRA COELHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Bioenergia

Piracicaba
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Pacheco, João Maurício

Aproveitamento de resíduos de colheita florestal para cogeração de energia em uma empresa localizada no estado do Paraná / João Maurício Pacheco. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

92 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade Estadual de Campinas. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”

1. Bioenergia 2. Reflorestamento 3. Cavaco de madeira 4. Modelagem I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese "in memoriam" ao meu Pai, Laeres Teles Pacheco e à minha mãe, Maria de Lourdes Pacheco e à minha Tia "Lica" (in memoriam) por todo o seu apoio, dedicação e perseverança em me manter sempre estudando.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que diretamente ou indiretamente contribuiram para a conclusão desta pesquisa, sendo o presente trabalho realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 / Número: 88882.378481/2019-01.

EPÍGRAFE

“Vários irmãos se recolhem, vão em frente
Vários também escravizam sua mente
Eu sei bem, quebro a corrente
Onde passo, implanto a minha semente
Gafanhotos nunca tomam de quem tem
Predadores, senhores que mentem
Esperem sentados a rendição
Nossa vitória não será por acidente ”

Bernardo F. G. dos Santos / Marcelo D2 / Jose H. C. de G. Pinheiro / Rafael Crespo

SUMÁRIO

RESUMO **8**

ABSTRACT **9**

LISTA DE FIGURAS **10**

LISTA DE TABELAS **12**

1. INTRODUÇÃO GERAL, REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CARACTERÍSTICA DO LOCAL DO ESTUDO. **13**

1.1 INTRODUÇÃO GERAL 13
1.2 OBJETIVO GERAL 14
1.3 ORIGINALIDADE DA TESE 14
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
1.4.1 Situação Atual das Florestas no Brasil e no Mundo *15*
1.4.2 Biomassa Florestal *18*
1.4.3 Setor Madeireiro *19*
1.4.4 Setor de Celulose *20*
1.4.5 Setor de Pellets e Briquetes *22*
1.4.6 Geração de energia a partir de biomassa florestal *24*
1.4.7 Tecnologias de Conversão Energética de Biomassa *27*
1.4.8 Parâmetros de Caracterização da Biomassa Florestal para Uso Energético *32*
1.4.9 Amostragem e modelos de produção *36*
1.5 CARACTERÍSTICA DO LOCAL DO ESTUDO 37
1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS - CAPÍTULO 1 40
REFERÊNCIAS 41

2. ANÁLISE DE CAVACO RESIDUAL NO CAMPO E NO PÁTIO DA EMPRESA DESTINADO A GERAÇÃO DE ENERGIA **48**

RESUMO 48
ABSTRACT 48
2.1 INTRODUÇÃO 49
2.2 OBJETIVO GERAL 50
2.2.1 Objetivo específico *50*
2.3 MATERIAIS E MÉTODOS 50
2.3.1 Biomassa Residual Direcionada a Energia *50*
2.3.2 Amostragem dos Diferentes Tipos de Cavaco *53*
2.4 RESULTADOS 56
2.4.1 Teor de Umidade *56*
2.4.2 Densidade Básica *58*
2.4.3 Granulometria do cavaco para bioenergia *60*
2.4.4 Análise da casca de Eucalyptus grandis *63*
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS – CAPÍTULO 2 64
REFERÊNCIAS 65

3. AJUSTE DE MODELOS VOLUMÉTRICOS PARA COPRODUTO DE *EUCALYPTUS GRANDIS* DESTINADO A ENERGIA **67**

RESUMO 67
ABSTRACT 67
3.1 INTRODUÇÃO 67
3.2 OBJETIVO GERAL 69
3.2.1 Objetivo específico *69*
3.3 MATERIAIS E MÉTODOS 69
3.3.1 Área do Estudo *69*
3.3.2 Silvicultura e Sistema de Colheita – COPRODUTO *69*
3.3.3 Cubagem Rigorosa do Coproduto *71*
3.3.4 Ajuste de modelos de produção para coproduto *73*
3.3.5 Análise de dados *76*
3.4 RESULTADOS 76
3.4.1 Ajuste de modelos de produção para coproduto *76*

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS – CAPÍTULO 3 78
REFERÊNCIAS 78

4. POTENCIAL ENERGÉTICO DE CAVACO RESIDUAL DE FLORESTAS DE *EUCALYPTUS GRANDIS* 80

RESUMO 80
ABSTRACT 80
4.1 INTRODUÇÃO 80
4.2 OBJETIVO DO CAPÍTULO 81
4.2.1 Objetivo específico 82
4.3 MATERIAL E MÉTODO 82
4.3.1 Análises laboratoriais 82
4.3.2 Potencial energético 82
4.3.3 Proporção volumétrica de madeira para celulose e para energia (coproduto) 83
4.3.4 Sistema de Cogeração de Energia 84
4.4 RESULTADOS 84
4.4.1 Análise de parâmetros em Dois Diferentes Tempos de Permanência no Campo (TPC) 84
4.4.2 Volume de madeira para celulose e para energia (coproduto) e potencial energético/econômico 86
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS – CAPÍTULO 4 89
REFERÊNCIAS 89

5. CONCLUSÃO GERAL, LIMITAÇÕES DO ESTUDO E PRÓXIMOS PASSOS 91

5.1 CONCLUSÃO GERAL 91
5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO E PRÓXIMOS PASSOS 92

RESUMO

Aproveitamento de resíduos de colheita florestal para cogeração de energia em uma empresa localizada no estado do Paraná

Com as mudanças climáticas devido aos massivos desmatamentos e na utilização de combustíveis fósseis como fonte principal de energia, muitos pesquisadores se dedicaram e se dedicam arduamente almejando um cenário energético 100% oriundo de fontes renováveis. Os reflorestamentos brasileiros possuem papel importante na diminuição da pressão sobre florestas naturais, principalmente considerando os impactos causados ao meio ambiente pelos desmatamentos ilegais. Advinda de fontes diversificadas, a biomassa residual pode ser proveniente do bagaço de cana-de-açúcar, resíduos florestais, resíduos sólidos urbanos (biogás), etc. No caso da biomassa residual de florestas, devido ao aprimoramento de novas tecnologias empregadas nas operações, um menor desperdício de matéria-prima no campo é observado. Esta tese tem por objetivo analisar quantitativa e qualitativamente a biomassa residual de florestas de rápido crescimento (*Pinus taeda* L. e *Eucalyptus grandis*) direcionado a energia, este resíduo é inerente ao sistema de colheita adotado pela companhia selecionada para estudo de caso. Foi avaliado a dinâmica do cavaco residual dentro da empresa (campo, pátio próprio e pátio terceiro) e em relação à posição do cavaco na pilha, estas análises levaram em conta os seguintes parâmetros: teor de umidade (%), densidade básica (g/cm³), teor de cinzas (%), poder calorífico (Kcal/Kg) e granulometria (mm). Para estimar o volume do coproduto foram ajustados modelos de produção objetivando a predição do volume do cavaco residual disponível. O cavaco do campo apresentou 6% a mais de umidade que o cavaco próprio e 11% maior que o cavaco comprado de terceiros. Com relação à posição do cavaco na pilha, o topo apresentou o menor teor de umidade, cerca de 7% menor que o meio e 5% menor que na base da pilha. Ao comparar a densidade do cavaco no campo com o de terceiros, há uma diferença de 9,5%. Os cavacos de maiores densidades concentraram-se em sua maioria no topo da pilha, 2,8% maior que no meio e 0,5% maior que na base da pilha. A granulometria do cavaco foi maior no campo que no pátio da empresa e os resíduos indesejados no cavaco do campo foram 17% menores que o cavaco estocado. O modelo 4 se ajustou bem aos dados, onde os parâmetros estatísticos apresentaram valores significativos (AIC: -501,4267 / R^2ajust.: 0,8730 / Syx %: 0,0621 / P-valor: <0,01), enfatizado pela distribuição de resíduos. Não foi observado diferença estatística entre os diâmetros da base e entre os volumes dos coprodutos, nas TPC's (Tempo de Permanência no Campo) 90, 150 e 320 dias. O teor de umidade do coproduto foi 23% maior na TPC 350. A densidade básica (g/cm³) da TPC 240 foi 8% maior que na TPC 350. O teor de cinza (%) na temperatura 500°C e 950°C foram 44% e 48% maiores na TPC 350. O poder calorífico é 6% maior na TPC 254 que na 350, sendo que o material perde por volta de 316 Kcal/kg. O IVC (Índice de Valor Combustível) foi maior quando a biomassa permaneceu menos tempo no campo (TPC 254), ocorreu uma variação de 66% no IVC em relação ao TC (teor de cinzas) 550°C e 63% no TC 950°C. A diferença na proporção do volume para energia foi de 13, 19 e 24% (5, 10 e 15 cm) maior que o montante destinado para celulose, devido a conicidade da árvore.

Palavras-chave: Bioenergia, Reflorestamento, Cavaco de madeira, Modelagem

ABSTRACT

Use of forest harvest residues for energy cogeneration in a company located in the state of Paraná - Brazil

With climate change due to massive deforestation and the use of fossil fuels as the main source of energy, many researchers have dedicated themselves and are hard at work aiming for an energy scenario 100% from renewable sources. Brazilian reforestation plays an important role in reducing pressure on natural forests, especially considering the impacts caused to the environment by illegal deforestation. The residual biomass coming from diversified sources, can come from sugarcane bagasse, forest residues, urban solid residues (biogas), etc. In the case of residual biomass derived from forests, less biomass was wasted is observed due to the improvement of new technologies used in operations. This thesis aims to quantitatively and qualitatively analyze the residual biomass of fast-growing forests (*Pinus taeda* L. and *Eucalyptus grandis*) directed to energy, this residue is inherent to the harvesting system adopted by the company selected for the case study. Was evaluated the dynamics of the residual wood chip within the company (field, own stock and purchased stock) and in relation to the position of the chip in the pile, these analyzes took into account the following parameters such as moisture content (%), basic density ($g.cm^{-3}$), ash content (%), calorific value ($Kcal.Kg^{-1}$) and granulometry (mm). Production models were adjusted in order to estimate the volume of the co-product and predict the volume of residual wood chip available. The field wood chips presented 6% more moisture than the own chips in stock and 11% higher than the chips purchased from outside. Regarding the wood chip position in the pile, the top had the lowest moisture content, about 7% lower than the middle and 5% lower than the bottom of the pile. When comparing the density of wood chip in the field with wood chips purchased from outside, there is 9.5% denser in the field. The highest density chips were mostly concentrated at the top of the pile, 2.8% higher than in the middle and 0.5% higher than at the bottom of the pile. The chip granulometry was higher in the field than in the company's stock and the unwanted residues (stone, soil and others) in the field chips were 17% smaller than the stored chips. Model 4 was adjusted very well in relation of the datas, where the statistical parameters presented significant values (AIC: -501.4267 / R^2adjust.: 0.8730 / Syx %: 0.0621 / P-value: <0.01), emphasized for the distribution of waste. No statistical difference was observed between the diameters of the base and between the volumes of the co-products, in the TSF (Time Spent in the Field) 90, 150 and 320 days. The moisture content of the co-product was 23% higher in TSF 350. The basic density (g/cm^3) of TSF 240 was 8% higher than in TSF 350. The ash content (%) at temperature 500°C and 950°C are 44% and 48% higher in the TSF 350. The calorific value is 6% higher in the TSF 254 than in the 350, and the material loses around 316 Kcal/kg. The FVI (Fuel Value Index) was higher when the biomass remained in the field for less time (TSF 254), there was a variation of 66% in the FVI in relation to the ash content at 550°C and 63% in the AC 950°C. The difference in the proportion of volume for energy was 13, 19 and 24% (5, 10 and 15 cm) higher than the amount destined for pulp, due to the canonicity of the tree.

Keywords: Bioenergy, Reforestation, Wood chips, Mathematical modeling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Países com as maiores áreas florestadas no mundo (10^3 ha^{-1}). 16
Figura 1.2. Incremento médio anual dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. 17
Figura 1.3. Alguns tipos de resíduos gerados pelo setor florestal. a) Serragem; b) Cepilho (plaina); c) Resíduos sólidos de madeira (construção, serraria, marcenaria etc.); d) casca de *Pinus taeda* L. e) Licor negro (Lixívia); f) Resíduos de colheita florestal de *Pinus taeda* L. 19
Figura 1.4. Produção mundial de madeira em tora por tipo. 20
Figura 1.5. Fases do processo de fabricação de polpa de celulose. 21
Figura 1.6. Produção mundial de celulose e papel. 21
Figura 1.7. Derivados de madeira utilizados na geração de energia. a) cavaco; b) pellets; c) briquetes. 23
Figura 1.8. Produtores de pellets no Brasil. 24
Figura 1.9. Sistema de transmissão, horizonte 2024. 25
Figura 1.10. Matriz Elétrica Brasileira. 26
Figura 1.11. Ciclo da combustão de biomassa florestal. 28
Figura 1.12. Esquema de uma caldeira de leito fluidizado borbulhante 29
Figura 1.13. Funcionamento básico de uma termelétrica. 30
Figura 1.14. Produção de energia por cogeração, utilizando diferentes fontes de biomassa (GW). 31
Figura 1.15. Dinâmica das massas de ar, solstícios de verão e inverno. 36
Figura 1.16. Diferentes modelos quanto sua estrutura e aplicação. 37
Figura 1.17. Mapa do Paraná - Telêmaco Borba. 38
Figura 1.18. Companhia Klabin, unidade Telêmaco Borba/PR. 38
Figura 1.19. Comparativo da produção em milhões de toneladas de celulose e papéis, entre os anos de 2019-2020. . 39
Figura 1.20. Fluxograma da cadeia produtiva florestal da companhia Klabin S/A. 39
Figura 1.21. Países que compram celulose da empresa Klabin S/A. 40
Figura 2.1. Processamento do *Eucalyptus urograndis* no campo. 1) a) fuste para celulose; b) casca; c) coproduto para energia. 2) Resíduos de casca de Eucalipto. 51
Figura 2.2. Processo de produção de cavaco para celulose. A) Descascamento das toras e produção de cavaco para celulose; B) Peneiramento do cavaco de celulose. 51
Figura 2.3. Fluxograma de produção da empresa até o produto final (Celulose e Energia). 52
Figura 2.4. Processo de produção de cavacos utilizando resíduos de colheita. a) Grua florestal / b) Pilha de coproduto / c) Picador para cavaqueamento CBI / d) Transporte do cavaco para energia. 52
Figura 2.5. Pátio de estocagem de cavaco residual para energia. A esquerda os cavacos mais escuros são os comprados de terceiros e a direita os cavacos produzidos pela empresa Klabin. 53
Figura 2.6. Processo de amostragem do cavaco – a) recipiente coletor / b) saco plástico devidamente identificado / c) pesagem. (ABNT, 2004). 53
Figura 2.7. a) Secagem das amostras de cavaco em b) estufa controlada a 105°C ± 2 e c) pesagem em uma balança com precisão de 0,001. 54
Figura 2.8. Método utilizado para determinação da densidade básica do cavaco. a) materiais utilizados: balança de precisão (0,001g), saco em tela plástica; b) pesagem do cavaco; c) bomba de vácuo; d) recipiente estanque. 54
Figura 2.9. Peneira granulométrica para separação do cavaco em diferentes tamanhos. a) peneiras utilizadas ((51, 38, 25, 19, 9, 4 mm e finos (<4 mm)) / b) cavaco retido na peneira. / c) visão superior da peneira montada. 55
Figura 2.10. Teor de umidade (%) do cavaco residual para uso energético, segundo NPR 14929. 56
Figura 2.11. Teor de umidade de cavaco residual comparando coleta no campo e no pátio da fábrica (2 tipos: Próprio e de Terceiros), coleta de dados de acordo com as normas da ABNT. 57
Figura 2.12. Teor de umidade da pilha de cavaco, referente as amostras coletadas no topo no meio e na base. 57
Figura 2.13. Densidade básica em g/cm^3 do cavaco determinada conforme as normas da NBR 11941. 58
Figura 2.14. Comparação da densidade básica relacionada aos 3 diferentes locais de coleta do cavaco. 60
Figura 2.15. Densidade do cavaco com relação a sua posição na pilha. 60
Figura 2.16. Comparação da granulometria do cavaco no Campo, Pátio Próprio e Pátio Terceiro para 5 diferentes tamanhos de peneira: 25, 19, 9, 4, finos (mm). 61
Figura 2.17. Comparação da granulometria do cavaco para bioenergia entre a maior peinara (25,4 mm) e menor peneira (finos < 4 mm). 62
Figura 2.18. Porcentagem de terra presente nos finos (<4 mm) direcionado a bioenergia. 62
Figura 2.19. Análise de microscopia da casca de *Eucalyptus grandis* nas dependências do laboratório de anatomia e dendrocronologia USP – ESALQ. 63
Figura 2.20. Análise microscópica da casca *Eucalyptus grandis* utilizando microscópio de precisão. 63
Figura 2.21. Porcentagem de casca presente nos finos (<4 mm) direcionada a bioenergia. 63
Figura 2.22. Comparação do teor de nutrientes entre casca e madeira*. 64

Figura 3.1. Processo de colheita visando a matéria-prima para fabricação de celulose e coproduto, nas áreas da Klabin de Telêmaco Borba-PR. 70
Figura 3.2. Coproduto baldeado pronto para o processo de picagem. 70
Figura 3.3. Picador florestal CBI posicionado para o carregamento dos caminhões. 71
Figura 3.4. Cubagem do coproduto a campo, onde: $Vcop\ 1$ (volume da primeira seção), $Vcop\ 2$ (volume da segunda seção), $gcop\ 1$ (diâmetro da base), $dcop\ 2$ (diâmetro no meio), $dcop\ 3$ (diâmetro da ponta), $Hcop$ (altura total) e $hcop$ ($Hcop/2$). 72
Figura 3.5. Método de duas aferições do diâmetro em cada ponto de interesse no coproduto. 73
Figura 3.6. Distribuição de resíduos para os quatro modelos testados (eixo y: resíduos em % / eixo x: volume em m³). 77
Figura 3.7. Gráfico de distribuição dos valores reais (linhas) e dados observados (pontos) dos quatro modelos ajustados no programa R. 77
Figura 3.8. Gráfico de distribuição dos valores reais (linhas) e dados observados (pontos) do modelo que melhor se ajustou (modelo 4). 78
Figura 4.1. Amostragem dos parâmetros para determinação do volume. 83
Figura 4.2. Amostras de cavaco direcionado a energia em duas TPC's (254 dias e 350 dias). 84
Figura 4.3. Comparação entre as densidades básicas (g/cm³) do capítulo 2 com as analisadas em duas diferentes TPC's do presente capítulo. 85
Figura 4.4. Diferença no aumento ou na diminuição do coproduto em 5, 10 e 15 cm destinado à energia (aumento do tamanho do coproduto) e na fabricação de celulose (diminuição do tamanho do coproduto) para o talhão BMIG8A, com 42,1 hectares. 87
Figura 4.5. Comparação entre rentabilidade dependendo do aumento (celulose) ou diminuição (energia) do tamanho do coproduto para uma área de 42,1 hectares de *Eucalyptus grandis*. 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Porcentagem (%) de cada fonte de energia utilizada pelo setor de papel e celulose. 22
Tabela 1.2. Dez maiores agentes de geração de energia através de biomassa. 26
Tabela 2.1. Granulometria de cavacos proposta pela LIPPEL utilizado como base granulométrica. 55
Tabela 2.2 - Resultado do teste de médias de Tukey com relação a umidade (%) do cavaco. 56
Tabela 2.3. Dados de teor de umidade em %, separados em cavaco do campo, cavaco do pátio (próprio e de terceiros) localizados no topo, meio e na base da pilha. 57
Tabela 2.4. Resultado do Teste de médias de Tukey com relação a densidade básica (g/cm³) do cavaco. 59
Tabela 2.5. Densidade básica do cavaco (g/cm³) em três diferentes posições na pilha (topo, meio e base) e referente a localização das pilhas na empresa (campo, pátio próprio e pátio terceiro). 59
Tabela 2.6. Porcentagem de cavaco para cogeração, submetido a peneiramento granulométrico, nas malhas 51, 38, 25, 19, 9, 4 e finos. 61
Tabela 2.7. Classificação do cavaco residual de acordo com classificação da LIPPEL. 62
Tabela 3.1. Modelos matemáticos utilizados no ajuste dos dados volumétricos de coproduto. 73
Tabela 3.2. Coeficientes ($b0$, $b1$ e $b2$) e estatísticas referentes aos modelos 1, 2, 3 e 4 para variável volume do coproduto ($Vcop$) em relação ao diâmetro do coproduto ($dcop$). 76
Tabela 4.1. Valores de Teor de Umidade %, Densidade Básica (g/cm³), Teor de Cinzas (%) e Poder Calorífico Superior, Inferior, Útil (Kcal/kg) e Índice de Valor Combustível (IVC). 85
Tabela 4.2. Dados referentes ao diâmetro média real das seções (preto: d1, d2, d3, d4, d5, d6), os diâmetros médios estimados no aumento do coproduto (d2 est., d3 est e d4 est.), altura (H) e o volume médio individual. 86
Tabela 4.3. Volume, Densidade Básica e Densidade Energética do coproduto de 42,1 hectares. 86
Tabela 4.4. Preços de mercado de alguns produtos florestais. 87
Tabela 4.5. Valores Anuais de Referência Específicos (VRES), de acordo com portaria nº 65, de 27 de fevereiro de 2018, Ministério de Minas e Energia. 88

1. INTRODUÇÃO GERAL, REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CARACTERÍSTICA DO LOCAL DO ESTUDO.

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

Almejando um cenário de produção energética 100% proveniente de fontes renováveis, muitos pesquisadores se dedicaram e se dedicam arduamente sobre esta temática. Com o avanço das tecnologias aplicadas na geração de energia é possível vislumbrar um cenário mais adequado a natureza, otimizando os recursos disponíveis e, principalmente, evitando o esgotamento total do meio ambiente.

O Brasil possui uma extensa área florestal, com maior predominância de tipologias naturais, que se comparada as áreas de florestas plantadas. Devido à grande extensão do território brasileiro o investimento em florestas plantadas de rápido crescimento foi responsável por 1,2% do PIB nacional em 2019 (IBÁ, 2019).

O fuste[1] é a principal matéria-prima obtida em florestas naturais e plantadas, onde é utilizado em vários segmentos industriais (celulose, móveis, esquadrias, caixarias, energia, etc.). Os reflorestamentos brasileiros possuem papel importante na diminuição da pressão sobre florestas naturais, principalmente considerando os impactos causados ao meio ambiente pelos desmatamentos ilegais. Normalmente, as florestas de crescimento rápido tendem a ser cultivadas de maneira sustentável pelas companhias, que focam na utilização otimizada dos recursos disponíveis. Em sua grande maioria, elas adéquam suas atividades para receber selos de qualidade (ex.: FSC - *Forest Stewardship Council* – Conselho de Manejo Florestal), favorecendo nos nichos de venda, principalmente exportação. Em 2018 as áreas de florestas certificadas no mundo (FSC e PEFC[2]) chegaram, a marca de 424 milhões de hectares (FAO, 2019).

Advinda de fontes diversificadas, a biomassa residual pode ser proveniente do bagaço de cana-de-açúcar, resíduos florestais, resíduos sólidos urbanos (biogás), etc. No caso da biomassa residual de florestas, devido ao aprimoramento de novas tecnologias empregadas nas operações, menor desperdício de matéria-prima no campo é observado. Esta revolução tecnológica permitirá, em um futuro próximo, a utilização de 100% dos recursos passíveis de aproveitamento, tanto no campo como na indústria. Ao vislumbrar um cenário de utilização total da matéria-prima florestal disponível (fuste, galhos e tocos), algumas restrições devem ser impostas, principalmente relacionado ao montante retirado. Isso permitirá manter as características físico-químicas do solo, ajudando a evitar possíveis erosões futuras (IBÁ, 2020).

Diversos pesquisadores como, Brito (1990), Fontes (1994), Gonçalves (2006), Wiecheteck (2009), Fernandes e Costa (2010), Cordeiro, Barros e Coimbra (2018) perceberam que a biomassa residual de florestas era uma oportunidade extremamente viável e muitas vezes economicamente rentável em empresas que possuem seus próprios reflorestamentos. A não utilização da biomassa residual contribui para o aumento das emissões de CO_2 devido à degradação microbiana e, concomitantemente, ocorre o desperdício energético do material. De acordo com Pedrosa-Macedo (1993) o acumulo deste material, principalmente galhos no piso da floresta, pode favorecer o aparecimento de pragas, como a da família *Cerambycidae* ("Serra-pau"). Machado, Oliveira e Silva (2007) recomendaram na cultura do gênero *Citrus* a catação deste material residual de poda para evitar incidência destes coleópteros. Além do mais, sempre que os resíduos florestais de baixo valor econômico estão disponíveis, eles podem competir com fontes de energia convencionais. O custo de matéria-prima pode ser zero para resíduos que, de outra forma, teriam custos de eliminação (IRENA, 2012).

---

[1] Tronco da árvore.

[2] *Programme for the Endorsement of Forest Certification*

A biomassa florestal possui grande valor no mercado de energia mundial, principalmente na forma de pellets de madeira, com notória participação do mercado Europeu. A produção de pellets para energia vem crescendo continuamente no mundo, obtendo um crescimento de 14% no período de 2017 a 2018 (EPC, 2019). Para atender o mercado europeu, certas exigências sobre seus componentes estão presentes na certificação ENplus (certificadora mundial com mais de 1.200 empresas associadas) pela EPC (2015), definindo parâmetros de emissões de particulados e substâncias inerentes a combustão. No Brasil existem algumas empresas certificadas pela ENplus, permitindo a exportação de pellets e briquetes, e produtos direcionados a energia.

Nos últimos anos a energia elétrica sofreu inúmeros reajustes e acabou por inviabilizou muitos negócios. De 2001 a 2005 a maior elevação do valor das contas de energia elétrica foi devido aos encargos e tributos, que cresceram 116% no per (ANEEL, 2005a). Entre os anos de 2007 e 2010 ocorreu um segundo reajuste tarifário, um terceiro entre 2011 e 2014 e um novo ciclo de revisões nas tarifas em 2015 (ANEEL, 2016). Segundo o Instituto de Desenvolvimento Estratégico do Setor Energético - ILUMINA (2020), no período que vai de 2015 a 2019 o valor da tarifa residencial aumentou por volta de 16% e a tarifa da indústria ficou em torno de 21%. Justamente pelo fato dos consecutivos aumentos nas tarifas de energia ao longo dos anos, empresas de outros segmentos industriais estão adotando a biomassa florestal como fonte de energia, principalmente indústrias que necessitam de vapor em sua linha de produção. Desta forma, os resultados desta pesquisa podem servir como subsídio para o planejamento e gestão da biomassa residual visando a produção de energia na indústria.

Neste contexto, esta tese possui 5 capítulos, sendo o capítulo 1 referente a introdução geral, objetivo geral, revisão bibliográfica e característica do local do estudo; o capítulo 2 apresenta a análise da dinâmica do cavaco destinado à geração de energia; o capítulo 3 estuda o ajuste de modelos volumétricos para coproduto; capítulo 4 analisa o potencial energético de cavaco residual de florestas e o capítulo 5 apresenta as conclusões gerais da tese.

1.2 OBJETIVO GERAL

Esta tese tem por objetivo geral analisar quantitativamente e qualitativamente a biomassa residual de florestas de rápido crescimento (*Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp.), inerente ao sistema de colheita adotado pela companhia selecionada para estudo de caso. As coletas de dados foram efetuadas nas áreas da Klabin de Telêmaco Borba-PR, onde procurou-se comparar o cavaco produzido pela própria empresa com aquele comprado de terceiros. Analisou-se a granulometria e o comportamento deste cavaco dentro da pilha onde é depositado, além das impurezas presentes em seu conteúdo (terra, casca e finos). Os modelos matemáticos foram ajustados com o intuito de estimar o volume de biomassa residual disponível, ajudando a traçar estratégias eficazes para a geração de energia. Avaliou-se então o potencial energético de cavacos em dois Tempos de Permanência no Campo (TPC), procurando entender o impacto da TPC na qualidade do cavaco.

O objetivo principal de utilização destes resíduos florestais é a geração de energia térmica e elétrica (cogeração) para a linha de produção da planta de papel e celulose. É importante salientar que análises de comparação de disponibilidade em cada etapa do processo ajudarão a entender a melhor estratégia de aproveitamento dos mesmos.

1.3 ORIGINALIDADE DA TESE

Com a evolução dos sistemas produtivos no mundo, a sustentabilidade passou a ter maior visibilidade pelo mercado, onde a utilização de recursos renováveis é primordial para garantir um meio ambiente equilibrado. Ao observar a situação atual, percebe-se que há uma necessidade de mudanças nos hábitos de consumo da sociedade e na conscientização produtiva das indústrias como um todo. Hoje, a matriz energética mundial ainda é predominantemente

composta por combustíveis fósseis, segundo a FAO (2020), mas há um apelo muito grande da sociedade pela substituição por fontes renováveis, devido ao avanço do aquecimento global.

As principais fontes de energias renováveis utilizadas no mundo, são: solar, eólica, térmica, hídrica e biomassa (vegetal e animal). Devido à grande extensão do território brasileiro, torna-se atrativo os investimentos em produção agrícola (Florestal e Agronômica) no país, favorecendo a utilização energética de biomassa destes setores. De acordo com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) – USP/ESALQ, o Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio nacional avançou 24,31% em 2020, em valores monetários, totalizou R$ 2 trilhões neste mesmo ano (CEPEA/USP, 2021). O setor de florestas plantadas no Brasil apresenta uma receita bruta total de R$ 97,4 bilhões, espera-se até 2023 a criação de 36 mil novos postos de trabalho (IBÁ, 2020).

A biomassa florestal é utilizada no setor industrial na confecção de embalagem, caixarias, celulose, papel e energia (resíduos de colheita, lixívia, aparas, etc.). Todas as companhias necessitam de uma maneira ou de outra, energia para sua linha de produção (térmica e/ou elétrica), muitas vezes com caldeiras movidas a combustíveis fósseis (óleo, gás natural). Companhias que possuem seus próprios reflorestamentos, perceberam a oportunidade de utilizar resíduos de colheita florestal na geração de energia, devido à ausência de preço, facilidade de obtenção do combustível e eliminação de resíduos indesejados. O estudo da dinâmica, comportamento e aproveitamento da biomassa residual é relativamente novo se comparado as outras áreas de estudo florestal já consolidadas, tais como manejo, silvicultura, tecnologia da madeira, entre outras. Este trabalho procurou aplicar métodos sólidos de análises para resíduo florestal que são empregados em outras áreas, como é o caso da modelagem de dados para florestas, aplicado em inventários para determinar a produtividade de talhões.

Buscou-se analisar um sistema de aproveitamento de biomassa residual de florestas de uma empresa do ramo florestal, com sede em Telêmaco Borba – PR. A companhia em questão adota o sistema de aproveitamento dos resíduos da colheita de madeira utilizando como fonte de energia, "o coproduto". Este é formado pelos galhos, somados ao volume da ponteira, acrescentado uma quantidade maior de madeira que seria destinado à celulose, objetivando melhorar a qualidade da biomassa para energia.

Como a utilização de resíduos de florestas é algo relativamente novo no meio florestal onde anteriormente eram menosprezados pelas empresas, faz-se necessário utilizar métodos consolidados em manejo de bosques para estimar e traçar estratégias energéticas mais eficazes. A originalidade deste estudo de caso se dá nas análises da dinâmica e das características do cavaco residual em uma empresa florestal no estado do Paraná, buscando entender as variações em diferentes locais dentro da própria empresa (campo, pátio de estocagem e cavaco comprado de terceiro), com isso foram ajustados modelos para prever a produção de coproduto em m^3 por meio da cubagem rigorosa.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

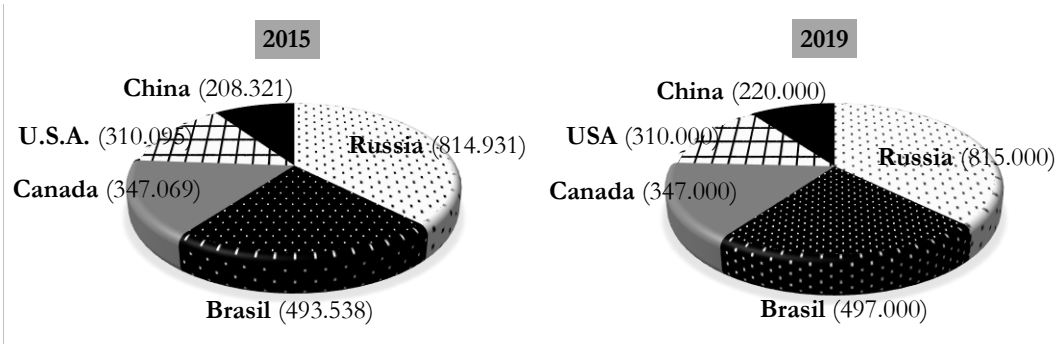
1.4.1 Situação Atual das Florestas no Brasil e no Mundo

É denominado "floresta" a tipologia vegetacional que apresenta indivíduos predominantemente lenhosos, onde as copas das árvores se inclinam umas contra as outras, formando um dossel (SNIF, 2016). Mais especificamente, a FAO (2015a) define floresta como: "terrenos com mais de 0,5 hectare contendo árvores com mais de 5 metros de altura e cobertura de copa de mais de 10%, ou árvores capazes de atingir esses limites *in situ*. Não inclui a terra predominantemente em uso agrícola ou urbano".

A situação atual das florestas no mundo aparece como bastante negativa, com base no indicador SDG (*Sustainable Development Goals*), as florestas mundiais diminuíram de 32,5% para 30,8% entre 1990-2020. Isso representa

uma perda líquida de 178 milhões de hectares. No entanto, a taxa média de perda líquida diminuiu cerca de 40% entre 1990-2000 e 2010-2020 (de 7,84 para 4,74 milhões de hectares por ano). A África teve a maior perda líquida entre o período de 2010-2020, de 3,94 milhões de hectares por ano, seguida pela América do Sul (2,60 milhões de ha.ano^{-1}). A Ásia apresentou o maior ganho líquido em área florestal no período 2010-2020, seguida pela Oceania e Europa. A Europa e a Ásia relataram um ganho líquido de floresta em 1990, embora ambas as regiões mostrem uma redução substancial na taxa de ganho desde 2010 (FAO; UNEP, 2020). O Brasil possui aproximadamente 58% do seu território coberto por florestas naturais e plantadas, sendo a segunda maior área em extensão (SNIF, 2016). De acordo com a FAO (2015b) e FAO e UNEP (2020) o país que possui a maior área de floresta no mundo é a Rússia, seguida por Brasil, Canada, U.S.A. e China (Figura 1.1).

Figura 1.1. Países com as maiores áreas florestadas no mundo (10^3 ha^{-1}).



Fonte: FAO (2015) / FAO e UNEP (2020).

A FAO e UNEP (2020) define florestas primárias como aquelas que são naturais e/ou regeneradas de espécies de árvores nativas, onde não há indicações de atividades humanas e os processos ecológicos não são perturbados. Essas florestas são de valor insubstituível e continuam diminuindo globalmente. Desde 1990 a área ocupada com floresta primária no mundo diminuiu em 81 milhões de hectares, mas a taxa de perda caiu mais da metade na última década. A área de florestas plantadas no mundo aumentou em 123 milhões de hectares desde 1990, cobrindo uma área total aproximada de 294 milhões de hectares em 2020, entretanto esta taxa vem diminuindo desde 2010. Aproximadamente 3% de todas as florestas no mundo são plantadas, compostas por uma ou duas espécies em espaçamentos regulares e estabelecidas principalmente para fins produtivos (indústria e comércio).

Em termos de reflorestamento, os gêneros *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. são os mais plantados no Brasil, sendo o segmento econômico com maior potencial de sustentabilidade (IBÁ, 2017). Em 1968 os reflorestamentos no país cobriam cerca de 1.050.000 hectares, dos quais 290.000 hectares correspondiam a *Eucalyptus* sp. e 471.000 eram de *Pinus* sp. (MATTOS, 198-). É atribuído ao engenheiro Edmundo Navaro de Andrade a introdução do gênero *Eucalyptus* no início do século XIX e ao Serviço Florestal de São Paulo a primeira tentativa de introduzir o gênero Pinus no Brasil, em 1948 (SANSIGOLO et al., 1983).

A presença do gênero *Eucalyptus* no Brasil data de 1860, onde os primeiros povoamentos foram implantados no estado do Rio de Janeiro. Iniciou-se também, uma série de experimentos na cidade de Jundiaí, no estado de São Paulo. Assim, concluiu-se que o Eucalipto poderia ser plantado em larga escala para o fornecimento de lenha à Companhia Paulista de Estradas de Ferro onde áreas extensas foram plantadas no Estado de São Paulo. Com a substituição das locomotivas a vapor por trens elétricos e movidos a diesel, o uso do Eucalipto como lenha se diversificou. No entanto, o crescimento das áreas reflorestadas passou a ter uma expansão insignificante no início de 1960, existindo na época não mais de 500 mil hectares reflorestados no país (SANSIGOLO et al., 1983).

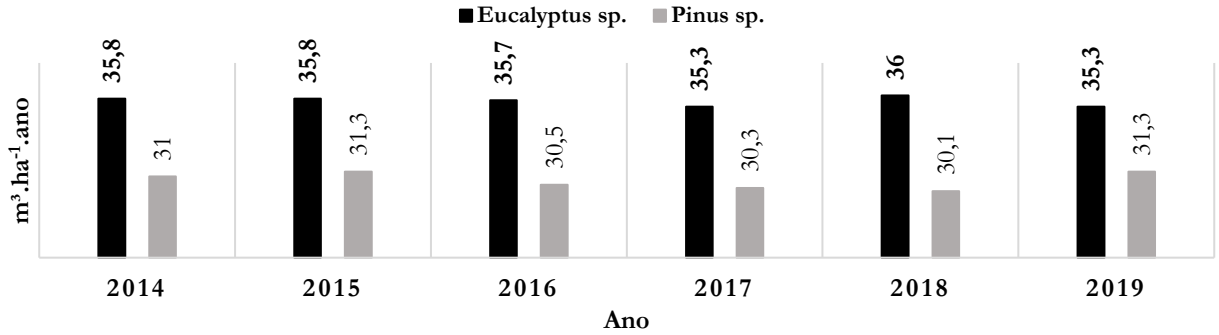
Os autores citados anteriormente afirmaram que em 1948 o Serviço Florestal de São Paulo foi responsável pelos primeiros plantios de *Pinus* sp. com o denominado pinheiro-chileno (*Pinus radiata*). Tendo a experiência fracassada devido à má adaptação da espécie ao ataque do fungo *Diplodia pinea*. Em 1958 o governo do estado de São Paulo introduziu com sucesso a espécie *Pinus elliotti*, havendo em 1960 cerca de 500.000 hectares plantados de *Pinus* sp.

Em 2016 o Brasil atingiu a marca de 7,8 milhões de hectares de reflorestamentos: *Eucalyptus* sp. (5,7 milhões de hectares) e o *Pinus* sp. (1,6 milhão de hectares). A maioria dessas plantações concentram-se nas regiões centro-oeste, sudeste e sul do país. A madeira certificada proveniente dessas plantações representa grande parte da economia brasileira, com vital importância no setor moveleiro, esquadrias, papel e celulose, etc. O setor florestal brasileiro responde por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no país, sendo responsável por 6,2% do PIB Industrial (IBÁ, 2017). Já em 2019, a área total de florestas plantadas foi de 9 milhões de hectares, um aumento de 2,4% em relação a 2018 (8,79 milhões de hectares). Desse total, 77% é representada pelo cultivo de Eucalipto (6,97 milhões de hectares), e 18% de pinus (1,64 milhão de hectares). Menos de 1% do valor total são de florestas plantadas de outras espécies como: Seringueira, Acácia, Teca e Paricá (IBÁ, 2019).

Os reflorestamentos brasileiros possuem um desempenho produtivo elevado em comparação com outros países. As condições edafoclimáticas, os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e qualificação da mão-de-obra, proporcionaram ganhos em produção florestal. Ao compararmos o incremento médio anual (IMA) de outros países, o *Eucalyptus* sp. no Brasil produziu em média 46% a mais (40,7 $m^3.ha^{-1}.ano$) que na Austrália (22 $m^3.ha^{-1}.ano$), país de origem da espécie. O crescimento do gênero *Pinus* sp. no Brasil é, em média, 66% maior (40,1 $m^3.ha^{-1}.ano$) que no sul dos E.U.A. (13,7 $m^3.ha^{-1}.ano$), país de origem do gênero *Pinus* (ABRAF, 2013).

Uma visão diferente é apresenta pelo Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2019), que utilizou de cálculos mais conservadores e realísticos do IMA, como mostra Figura 1.2. Se comparado, há uma divergência de valores e isso provavelmente ocorre devido as metodologias utilizadas. Mas mesmo com esta divergência, o Brasil ainda segue na primeira posição em relação ao plantio de árvores de rápido crescimento.

Figura 1.2. Incremento médio anual dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*.



Fonte. (IBÁ, 2019).

No Brasil, a maior extensão de área de plantios do gênero *Eucalyptus* se encontra na Região Sudeste; Minas Gerais detém 26,0% da área do país, seguido por São Paulo com 12,7%; no Sul os plantios são distribuídos uniformemente entre os três estados; e por fim, no Centro-Oeste, o Mato Grosso do Sul representa 14,8% da área

nacional. O Sul reúne a maior área nacional com plantios do gênero *Pinus* e outras[3] espécies (43,1%), seguido pelo Norte (31,1%) e o Centro-oeste (19,3%). O estado de Minas Gerais detêm a maior área plantada de florestas (20,4%), seguidas por Paraná (14,8%), São Paulo (11,8%), Mato Grosso do Sul (11,3%), Rio Grande do Sul (10,3%) e Santa Catarina (9,6%) (BRAINER, 2021).

As florestas de rápido crescimento no Estado do Paraná estão distribuídas de forma heterogênea em seu território, o centro sul com 84,45% dos plantios, localizados principalmente nas cidades Ponta Grossa (37,51%) e Curitiba (19,42%). Do total de áreas de reflorestamento do estado do Paraná, 46% estão registrados na Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal (466.118,25 hectares). Dentre os gêneros mais plantados está o *Pinus* (322.232,44 hectares) e *Eucalyptus* (130.846,98 hectares). Do total de áreas registradas direcionadas a celulose e papel, têm-se o que corresponde a uma extensão de 21.792,06 hectares, divididos entre Pinus e Eucalipto, sendo 74% do Eucalipto destinado a produção de celulose e papel. (APRE/KLABIN, 2020).

1.4.2 Biomassa Florestal

A população mundial depende das florestas e de sua biodiversidade para o seu desenvolvimento social. As florestas fornecem mais de 86 milhões de empregos no globo e são o sustento de muitas regiões. Estima-se que mundialmente 880 milhões de pessoas passam parte de seu tempo coletando biomassa florestal para produzir carvão objetivando o preparo de alimentos, devido a questões culturais as mulheres são as mais afetadas (inalação de gases nocivos à saúde). Cerca de 252 milhões de pessoas que vivem em florestas e savanas possuem renda menor que US $ 1,25 por dia (FAO; UNEP, 2020).

Por meio da fotossíntese as plantas retiram o carbono da atmosfera, aproveitando a luz solar com fonte energética e a transformam em biomassa. A Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) estimou que 9 milhões de hectares de árvores plantadas no Brasil são capazes de estocar por volta de 1,88 bilhão de toneladas de CO_2 equivalentes. No caso de áreas de conservação como Áreas de Preservação Permanente (APP), Reserva Legal (RL), etc., possuem um potencial de produção de biomassa florestal de 2,6 bilhões de toneladas CO_2 equivalentes (IBÁ, 2020).

A biomassa florestal para fim energético é geralmente produzida a partir das seguintes fontes: reflorestamentos de curta rotação, resíduos de colheitas que normalmente seriam deixados no local (disperso ou em pilhas), resíduos de madeira e detritos recolhidos através de sistemas de resíduos sólidos urbanos e caules que são atualmente consideradas não comercializáveis, incluindo até mesmo aqueles colhidos no curso de atividades de manejo florestal (WHITE, 2010).

Os segmentos de produção florestal que possuem biomassa residual passíveis de se utilizar são: indústrias de compensado, serrarias, celulose e papel, painéis de madeira e indústria moveleira. Estes resíduos são classificados em serragem, cepilho, sólidos de madeira, cascas, licor negro entre outros, sendo gerados desde o transporte da madeira até seu processamento (Figura 1.3), finalizando no produto acabado (WIECHETECK, 2009).

De acordo com Fontes (1994), a serragem é um resíduo advindo de operações com serra, encontrada na maioria das indústrias de desdobramento de madeira, exceto em laminação. O cepilho é gerado através das plainas, sendo disponibilizado seco. Já os resíduos sólidos de madeira de origem industrial como a costaneira, aparas, refilo, casca e os resíduos de colheita florestal tais como galhos e tocos, são de maiores dimensões sendo geralmente destinados para a geração de energia.

[3] Acácia negra, Seringueira, Teca etc.

Figura 1.3. Alguns tipos de resíduos gerados pelo setor florestal. a) Serragem; b) Cepilho (plaina); c) Resíduos sólidos de madeira (construção, serraria, marcenaria etc.); d) casca de *Pinus taeda* L. e) Licor negro (Lixívia); f) Resíduos de colheita florestal de *Pinus taeda* L.

Fonte. Adaptado Pighinelli (2015), Cerâmica Santa Isabel e br.depositphotos.com.

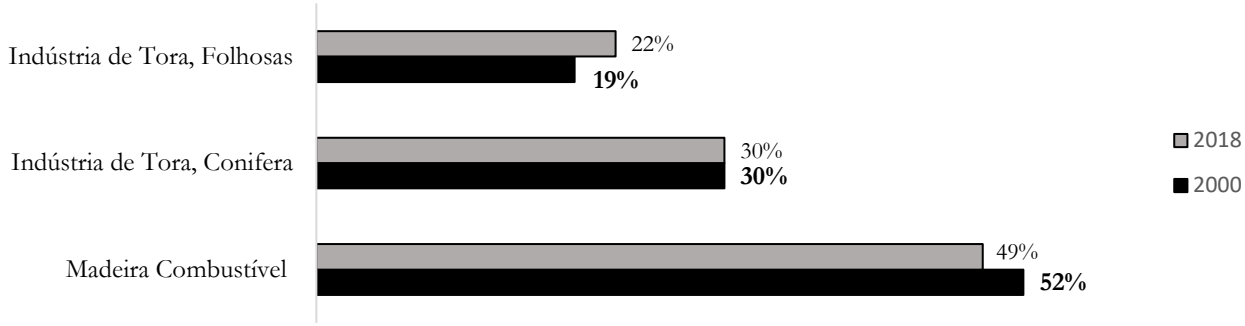
1.4.3 Setor Madeireiro

O produto madeireiro mais utilizado no mundo é a lenha, cerca de 31% de toda a produção global de biomassa florestal, sendo, inclusive, a principal fonte de energia em países subdesenvolvidos. Outros subprodutos da cadeia madeireira com notória produção são a madeira serrada (8%), o carvão vegetal (4%), postes e madeira para construção civil (4%) e produtos não madeireiros[4] (11%) (ANGELSEN et al., 2014).

Dados da FAO *Statistics* (2020) com relação à utilização de madeira em tora no mundo (Figura 1.4), indicam que a indústria de toras de folhosas (Angiospermas) tiveram um aumento de 3% em 18 anos, já para as toras de coníferas não foram verificadas mudanças na porcentagem de produção e a madeira utilizada para energia teve uma redução de 3%. Neste mesmo período o carvão vegetal teve um aumento de 31% e a produção de Pellets e Briquetes de 2012 a 2018 um aumento de 52%, estes valores são justificados pelo grande investimento da União Europeia em equipamentos adaptados para biomassa vegetal, principalmente utilizando pellets e briquetes no aquecimento de residências e em plantas industrias.

[4] Folhas, frutos, sementes, resina etc.

Figura 1.4. Produção mundial de madeira em tora por tipo.



Fonte. (FAO STATISTICS, 2020).

Por possuir uma das maiores extensões de terra do mundo e pelas condições edafoclimáticas favoráveis ao crescimento florestal, o Brasil possui um enorme potencial madeireiro. A exploração desenfreada sobre florestas nativas é relatada desde a chegada dos portugueses e espanhóis nas Américas. Em tempos recentes (século XX), o apelo pela estabilização e/ou redução do consumo de florestas naturais aumentou drasticamente, influenciado por políticas públicas e manifestações ambientais pelo mundo. Com isso, empresas do seguimento madeireiro estão se adequando a um futuro mais sustentável, adotando novas alternativas, principalmente realizando manejos florestais adequados e otimizados para melhor manutenção do meio ambiente (BITTENCOUR; OLIVEIRA, 2009).

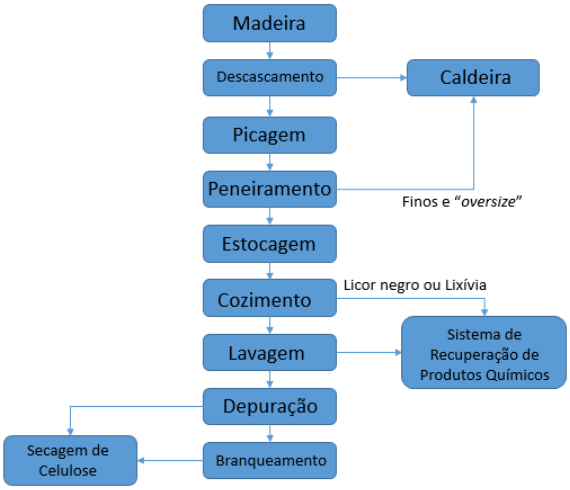
Dados coletados pelo sistemas oficiais de controle florestal citados por Lentini, Sobral e Vieira (2020), em 2018 a Amazônia produziu 6,2 milhões de m^3 de produtos, onde foram processadas em chapas, lâminas, madeira serrada, produtos acabados de madeira, etc. Mesmo com essa produção, pouco mais de 1/3 foi destinado ao consumo interno do estado.

As matérias-primas advindas de florestas plantadas estão presentes em nossa sociedade em forma de vários tipos produtos, pode-se citar o papel, cápsulas de medicamentos, espessantes de alimentos, pisos laminados, carvão vegetal para aço verde, tecidos, produtos de higiene (pasta dentária e alguns shampoos), etc. Além de aquecer o mercado produtivo, este setor gera muitos empregos, em 2019 registrou uma receita bruta de R$ 97,4 bilhões, aumento de 12,6% em relação ao ano anterior (IBÁ, 2020).

1.4.4 Setor de Celulose

Existem vários métodos de fabricação da celulose, sendo eles divididos em processo mecânico, físico, biotecnológico e químico. O processo mecânico possui vantagem de não utilizar produtos químicos, entretanto consome elevada quantidade de energia, inviabilizando sua utilização. O método físico produz celulose através da irradiação por raios gama, tratamento a vapor e explosão com vapor, este método normalmente é utilizado em conjunto com os químicos. O processo biotecnológico ainda está em fase de pesquisa, utiliza agentes fúngicos ou bacterianos para a separação dos componentes da madeira (celulose, hemicelulose e lignina). O método mais utilizado pelas empresas do ramo florestal para a fabricação de celulose é o método químico. Este processo consiste em utilização de agentes químicos específicos para cozinhar a madeira sob pressão e podem ser classificados de acordo com o tipo de químicos utilizados e pelo pH do tratamento químico utilizado. Independentemente do método utilizado, todos os processos seguem o fluxo ilustrado na Figura 1.5 (CASTRO, 2009).

Figura 1.5. Fases do processo de fabricação de polpa de celulose.

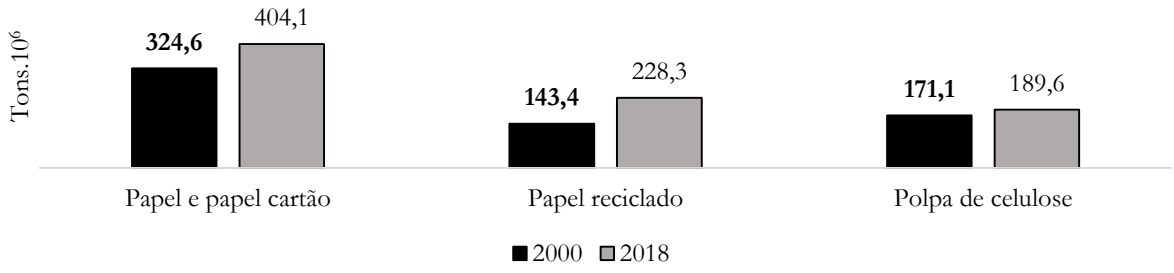


Fonte. Adaptado (CASTRO, 2009).

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2020) o Brasil é o maior exportador de celulose do mundo, seguido por Canadá, Estados Unidos e Chile. Em 2019 as exportações brasileiras corresponderam a 7,5 bilhões de dólares, sendo os dois principais compradores China e Estados Unidos (US$ 5,5 bilhões), participação de quase 50% do setor, sendo que somados Ásia, Europa e América do Norte a participação supera os 80%.

Com relação a produção mundial de celulose e papel, a FAO *Statistics* (2020) divide em produção de papel reciclável, polpa de celulose, papel e papel cartão, que juntos são responsáveis por uma produção total de 822 milhões de toneladas em 2019. Destaque para a produção de papel e papel cartão atingindo a margem de 404,1 milhões de toneladas (Figura 1.5).

Figura 1.6. Produção mundial de celulose e papel.



Fonte. (FAO STATISTICS, 2020).

A fabricação de celulose demanda um montante elevado de energia térmica e elétrica, para baratear os custos são utilizados subprodutos do cozimento da madeira, no caso, o que tem maior notoriedade é a Lixívia. Como já foi dito a lixívia é um subproduto da produção de celulose, sendo assim a disponibilidade desta biomassa é abundante neste setor, sendo responsável em 2019 por 50,9% da geração de energia de uma planta de celulose (Tabela 1.1) (EPE, 2020).

A lixívia teve a maior participação na geração de energia para as plantas de papel e celulose, responsável por 51% de toda geração (Tabela 1.1), seguidos pela lenha e seus subprodutos (EPE, 2020). As maiores geradores de energia elétrica através da biomassa florestal, tanto lenhosa (cavaco, madeira em tora) quanto subproduto são as empresas Suzano S/A e Klabin S/A (ANEEL/SIGA, 2021).

Tabela 1.1. Porcentagem (%) de cada fonte de energia utilizada pelo setor de papel e celulose.

Fontes	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Lenha	14,9	14,8	15,3	15,3	15,3	15,6	15,7	15,7	15,1	15,7
Lixívia	46,5	46,2	46,4	47,1	48,6	49,8	50,4	51	51,8	50,9
Eletricidade	16,1	16,1	16,4	15,9	15,9	15,9	15,8	15,8	15,4	15,8
Outras[5]	22,5	22,9	21,9	21,7	20,2	18,7	18,1	17,5	17,7	17,6
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte. (EPE, 2020).

1.4.4.1 Lixívia

O licor negro ou lixívia é o resíduo gerado no processo de fabricação da celulose para a produção de papel *kraft*, ele apresenta consistência liquida pastosa, possuindo coloração negra como o próprio nome diz (ANDREUCCETTI, 2010). O processo Kraft combina dois reagentes químicos, o NaOH (hidróxido de sódio) e o Na_2S (sulfeto de sódio), eles atuam diretamente na madeira já cavaqueada, onde o objetivo é a retirada da lignina e a liberação das fibras. Após o cozimento nos digestores a polpa é lavada, ocorrendo a extração do licor negro e, por conseguinte, enviado para o evaporador. Após a evaporação, os químicos são recuperados (NaOH e Na_2S) e a lixívia direcionada a caldeira para a geração de energia (CARREIRO, 2009). Segundo dados da ANEEL (2019), no total são 18 usinas em operação no Brasil que funcionam exclusivamente com lixívia. A capacidade instalada para a geração de energia elétrica através da lixivia no país é de 2.542 MW, perdendo apenas para a geração através do bagaço de cana-de-açúcar (11.265 MW).

Devido ao alto custo da energia proveniente das distribuidoras brasileiras, atrelado à uma possível venda dos excedentes para o mercado nacional, fez com que muitas empresas investissem pesado em pesquisa e tecnologia. No setor de celulose e papel, desde a década de 40, o processo de recuperação e geração de energia é de extrema importância. As caldeiras de recuperação recebem o título de maiores do mundo das quais utilizam biomassa como fonte de energia (JORGE, 2018).

1.4.5 Setor de Pellets e Briquetes

De acordo com Wiecheteck (2009) as alternativas tecnológicas de processamento de resíduos no setor florestal para a produção de energia são a combustão, gaseificação e/ou pirólise, utilizando lenha, cavaco e/ou pellets e briquetes. As tecnologias de briquetagem e de peletização transformam a biomassa na sua forma triturada em blocos compactos com diversas dimensões. São utilizados basicamente para a queima em fornos, caldeiras, lareiras e fogões. A diferença entre eles está na densidade (para briquetes é de 650-1200 kg/m^3; para pellets, 650 a 700 kg/m^3), no diâmetro (briquetes, com 60 mm; pellets, com 6-16 mm) e no comprimento (briquetes, com 25-300 mm; pellets, com 25-30 mm). Ambos têm Poder Calorífico Superior (PCS) na faixa de 16,92 a 17,64 MJ/kg e umidade entre 7 e 12% (EMBRAPA, 2012).

[5] Carvão vapor, Gás Natural, Óleo Combustível etc.

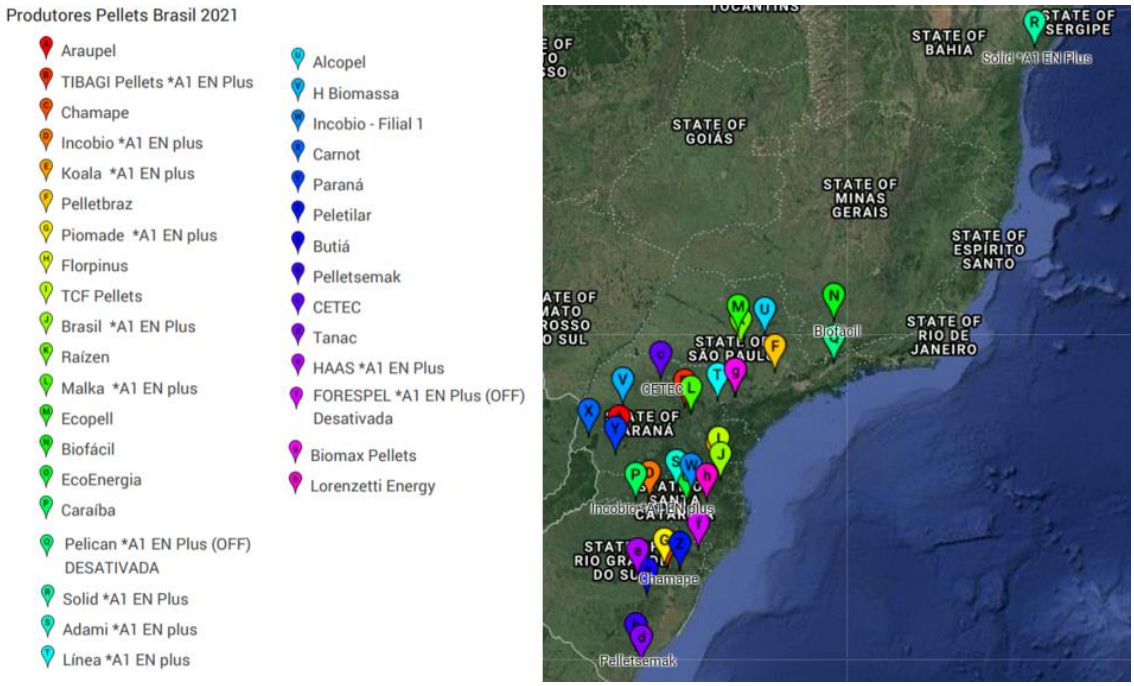
Figura 1.7. Derivados de madeira utilizados na geração de energia. a) cavaco; b) pellets; c) briquetes.

Fonte. Adaptado www.solostocks.pt.

A fabricação de pellets no mundo aumenta anualmente, chegando a marca de 36,1 milhões de toneladas em 2016, demonstrando um crescimento de 11% se comparado a 2015. A União Europeia é globalmente responsável pela maior produção de pellets em 2016, alcançando 16,6 milhões de toneladas. Em segundo lugar estão os norte-americanos, que aumentaram em 5% a produtividade, chegando a marca de 9,9 milhões de toneladas. Em terceiro lugar a Ásia, responsável por fabricar 9,3 milhões de toneladas de pellets (EUROPEAN PELLET COUNCIL, 2017). Em 2018 a UE consumiu em pellets, aproximadamente 27,4 milhões de toneladas sendo o maior mercado relacionado a pellets da atualidade (OLIVEIRA, 2019).

A produção de pellets no Brasil em 2017 foi de 470 mil toneladas, um acréscimo de 335 mil tons. se comparado com a produção de 2016 (135 mil tons) (GARCIA, 2018). Segundo Quéno (2015) todas as fábricas de pellets no Brasil estão em processo de melhoria da qualidade e somente três companhias possuem o selo de certificação europeia ENplus, sendo a empresa PIOMADE localizada em Farroupilha, RS, a primeira empresa brasileira a ser certificada. As outras duas estavam em processo de certificação na época e as demais buscavam realizar análises periódicas de qualidade, muitas já possuíam níveis correspondentes aos critérios do mercado europeu. Garcia et al. (2021) afirmaram que existem atualmente no Brasil 11 empresas com certificação ENplus sendo que 10 estão em atividade (Figura 1.8).

Figura 1.8. Produtores de pellets no Brasil.



Fonte. (GARCIA et al, 2021).

De acordo com Escobar (2016) ao se transformar materiais lenhosos em pellets, deve-se controlar os teores de enxofre e cloro contidos na biomassa utilizada. Dependendo dos níveis destes elementos haverá a formação de gases tóxicos (SO_x e compostos organoclorados), muitas vezes gerando químicos mutagênicos. Naturalmente, alguns materiais lenhosos podem também possuir alto teor de cinzas, onde uma concentração elevada deste material acarretará em uma frequência maior de manutenção dos equipamentos e problemas de saúde na população vizinha.

A certificação europeia sobre a qualidade de pellets é coordenada pela ENplus que define três diferentes classes. A primeira classe são os denominados pellet ENplus A1, para serem classificados assim os pellets devem possuir teor de cinzas ≤ 0,7%, teor de nitrogênio ≤ 0,3% e um teor de cloro ≤ 0,02%. A segunda classe é chamada de ENplus A2, possui características similares ao A1 como no caso do cloro (mesmo teor), esta classe é um pouco mais tolerante em relação ao teor de cinzas, que deve permanecer ≤ 1,2%, e ao teor de nitrogênio ≤ 0,5%. A terceira classificação chama-se ENplus B, são aceitáveis teores de cinzas ≤ 2,0%, teor de nitrogênio ≤ 1,0% e um teor de cloro ≤ 0,03% (EPC, 2015).

1.4.6 Geração de energia a partir de biomassa florestal

1.4.6.1 Histórico

A primeira geração dos sistemas de fornecimento de energia elétrica era composta por sistemas em corrente contínua que atendiam pequenas áreas. Já a segunda geração foi implantada em corrente alternada, a energia era transmitida para os centros consumidores onde as linhas de transmissão eram empregadas por meio de postes e cabos aéreos que prejudicavam a paisagem urbana (BANDEIRA, 2012).

O mesmo autor afirmou que a terceira geração dos sistemas de fornecimento de energia caracterizou-se, principalmente, pelo compartilhamento do uso do subsolo pelas prestadoras de serviço público. Entretanto, esses sistemas ainda empregam, primordialmente, tecnologia analógica na execução das funções de medição, operação e proteção.

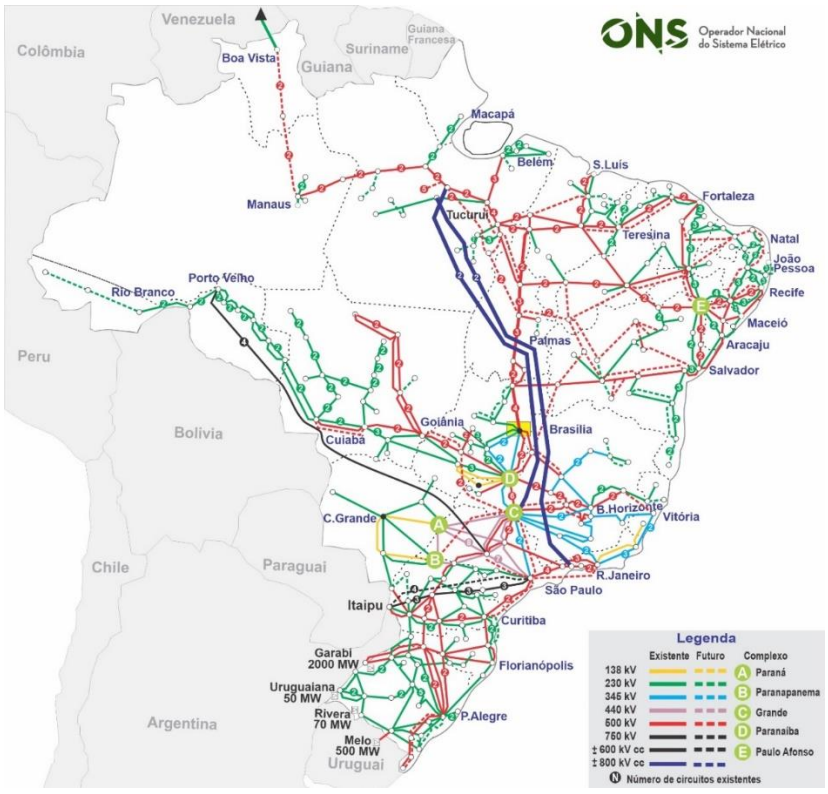
Os sistemas *smart grids*, denominados de quarta geração, tem o potencial de melhorar significativamente as redes de hoje, fornecendo energia descentralizada a partir de fontes mais limpas com maior eficiência e confiabilidade, além de fornecer maior equidade e transparência para consumidores e produtores (FRIBUSH; PARKER; ENTERLINE, 2010).

Para consolidar a descentralização das fontes geradoras de energia elétrica no Brasil, foi criada a Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012. Ela estabelece as condições gerais para a microgeração (até 75 kW) e minigeração (de 75 kW a 5 MW) distribuída e também define o sistema de compensação de energia elétrica. Este sistema de compensação injeta energia na rede produzida em excesso por unidades consumidoras onde posteriormente compensada pela distribuidora favorecida. Ao produzir excedentes, o consumidor poderá optar pela geração compartilhada, que é caracterizada pela reunião de consumidores em local diferente das unidades de micro e minigeração (MOREIRA, 2012).

1.4.6.2 Setor energético brasileiro

No ano de 2021, segundo a NOS, o sistema interligado nacional (SIN) atingiu a marca de 148.567,1 km de linhas de transmissão, onde 40% são representadas por sistemas de 230 kV (Figura 1.8). Segundo previsões de expansão para os próximos três anos, a classe de 500 kV deve sobressair a classe de 230 kV, isso é devido aos reforços nas interligações entre as regiões que irá otimizar os recursos energéticos locais (SINDAT/ONS, 2021).

Figura 1.9. Sistema de transmissão, horizonte 2024.

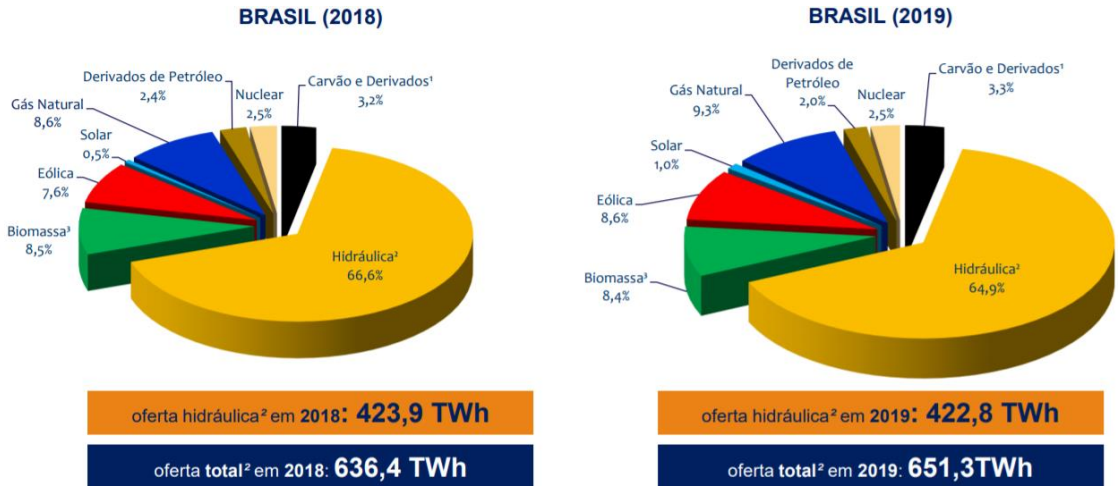


Fonte. (SINDAT/ONS, 2021).

Após uma predominância da hidroeletricidade outras fontes estão sendo utilizadas. Além das termoelétricas a combustível fóssil (as chamadas "térmicas emergenciais"), ocorreu uma expansão significativa da energia eólica nos anos recentes. Em 2017 a oferta interna de energia atingiu 1,3% a mais que no ano anterior, influenciado pela oferta interna de gás natural e energia eólica. As hidrelétricas possuem a maior participação na matriz elétrica brasileira,

seguidas por gás natural e biomassa (EPE, 2018). Os aumentos mais significativos entre 2018 e 2019 foram energia solar, gás natural e energia solar, com acréscimo de 1 %, 0,7 % e 0,5 % em gás natural, respectivamente.

Figura 1.10. Matriz Elétrica Brasileira.



Fonte. (EPE, 2020).

Segundo a ANEEL (2019) as geradoras de energia elétrica movidas a biomassa são provenientes de fontes diversas. As que estão em operação no Brasil são movidas a bagaço de cana-de-açúcar (CI[6] = 11.414,8 MW), biogás (CI = 167,1 MW), capim-elefante (CI = 31,7 MW), casca de arroz (CI = 53,3 MW), etanol (CI = 0,32 MW), óleos vegetais (CI = 4,35 MW), carvão vegetal (CI = 48,2 MW), gás de alto forno (CI = 127,7 MW), Lenha (CI = 36,7 MW), Licor Negro (CI = 2.542,61 MW), carvão vegetal (5,25 MW) e Resíduos Florestais (CI = 434,1 MW).

Ações regulatórias incentivaram recentemente a compensação de excedentes produzidos por sistemas de pequeno porte. Com isso, houve um aumento de 245% na micro e minigeração distribuída, sendo que a participação de energia fotovoltaica é de 46%, a hidráulica 23,5%, resíduos agroflorestais 22,8% e eólica 5% (EPE, 2018).

Segundo o SIGA – Sistema de Informação de Geração da ANEEL (2021) as 10 maiores geradoras de energia utilizando biomassa como combustível estão apresentadas na Tabela 1.2. Destaca-se a Suzano S.A. e a Klabin S.A. em primeiro e segundo lugar, respectivamente, ambas do setor florestal brasileiro, especialistas em cultivo de florestas de rápido crescimento (Pinus e Eucalipto).

Tabela 1.2. Dez maiores agentes de geração de energia através de biomassa.

	Agente	KW
1	Suzano S.A.	1.177.480
2	Klabin S.A.	514.877
3	Tereos Açúcar E Energia	367.143
4	Bioenergia Barra Ltda.	323.000
5	Companhia Brasileira de Energia Renovável	305.056
6	COFCO International Brasil S.A.	295.200
7	Biosev S.A.	288.400
8	CMPC Celulose Rio-grandense Ltda.	250.994
9	Usina de Açúcar Santa Terezinha Ltda.	219.775
10	Eldorado Brasil Celulose S.A.	214.103

Fonte. (ANEEL/SIGA, 2021).

[6] Capacidade Instalada

1.4.7 *Tecnologias de Conversão Energética de Biomassa*

1.4.7.1 Combustão

Toda combustão exige três elementos: combustível (no caso, a madeira), o oxidante e uma fonte de calor (triângulo do fogo). Quando estes três elementos são combinados de maneira apropriada a combustão irá ocorrer. Se qualquer um dos elementos é removido ocorrerá a interrupção do processo (VOGEL, 2005). Blaselbauer (2010) afirmou que os elementos mais comuns encontrados na queima de madeira (combustão) são CO_2 (gás carbônico ou dióxido de carbono), CO (monóxido de carbono), cinzas, fuligens e compostos de NO_x (compostos altamente corrosivos).

De acordo com os estudos de Palmer et al. (2011), a combustão completa de madeira produz as emissões de partículas finas como dióxido de nitrogênio (NO_2) e dióxido de carbono (CO_2). Já a combustão incompleta da madeira resulta na libertação de gases voláteis orgânicos como o monóxido de carbono (CO). Há também neste último processo a liberação de outras substâncias indesejáveis sendo algumas, inclusive, carcinogênicas e carregando consigo, altos níveis de partículas suspensas. Para efeito de exemplo, a emissão de fumaça preta de uma chaminé é um visível sinal de combustão incompleta. A fim de garantir a combustão completa da biomassa as caldeiras exigem as seguintes características:

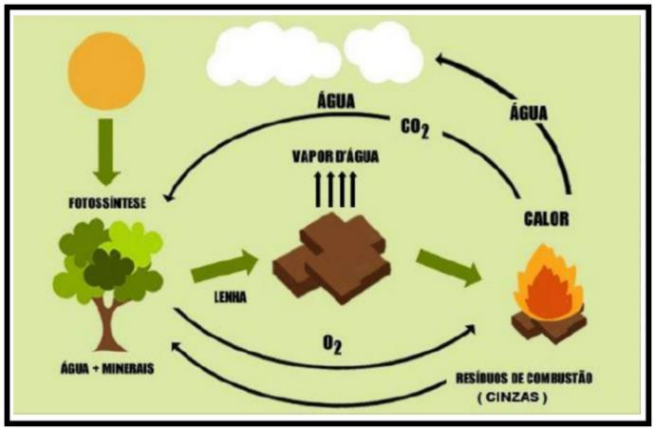
- O teor de umidade do combustível deve estar dentro do aceitável pela caldeira. Em particular, teores mais elevados podem, invariavelmente, produzir excesso de fuligem;

- Um mecanismo de alimentação que ajusta a quantidade de combustível em relação ao ar no interior da caldeira, em tempo real, dependendo da caldeira;

- Monitorar o combustível e a velocidade dos ventiladores de ar da combustão.

Em relação à combustão, a biomassa florestal apresenta vantagens significativas sobre combustíveis fósseis, principalmente relacionadas a emissões. Isto se deve a equivalência do dióxido de carbono absorvido pelas plantas na fotossíntese (BRAND, 2010). As árvores e todos os vegetais são organismos autótrofos, ou seja, produzem o seu próprio alimento através da fotossíntese. Esta reação acontece no cloroplasto onde, basicamente, ocorre a redução do CO_2 com ajuda da energia solar, promovendo o crescimento da biomassa (FURLAN, 2015).

Figura 1.11. Ciclo da combustão de biomassa florestal.



Fonte. LIZ (2017).

O processo de combustão deve assegurar economia e eficiência na queima do combustível para a geração de energia. É importante determinar o excesso de ar disponibilizado para a reação, fator de extrema importância para garantir a otimização do processo que emprega biomassa florestal como combustível. As quantidades complementares de ar são necessárias em condições reais para minimizar o deposito de material residual dentro da caldeira e na chaminé. O excesso de ar minimiza as perdas por combustão parcial, todavia, maiores fluxos de ar implicam em maiores perdas por calor sensível com os gases produzidos na reação. É necessário alcançar um ponto ótimo que favoreça uma menor perda de energia no processo. Este ponto ótimo de mistura entre ar e combustível dependerá basicamente do tipo de combustível e do agente de combustão. O efeito de turbilhonamento permite uma sensível redução do coeficiente de excesso de ar. (SCHÜRHAUS, 2007).

De acordo com o mesmo autor, o coeficiente de excesso de ar é dado pela Expressão 1:

$$\alpha = \frac{m_{ar}}{m_{ar}^{\odot}} = \frac{\forall_{ar}}{\forall_{ar}^{\odot}} \quad (1)$$

Onde:

α: coeficiente de excesso de ar;

$m_{ar}^{\odot}$: massa de ar estequiométrico ($kg.kg_{comp}^{-1}$);

m_{ar}: massa de ar real ($kg.kg_{comp}^{-1}$);

$\forall_{ar}^{\odot}$: volume estequiométrico do ar ($m^3n.kg_{comb}^{-1}$);

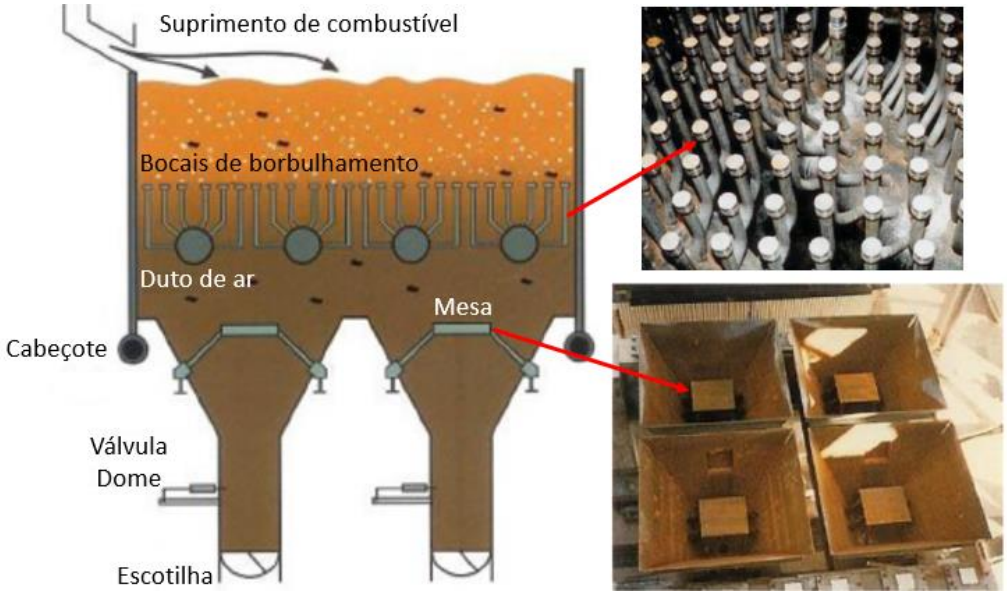
$\forall_{ar}$: volume real de ar.

1.4.7.2 Caldeiras de Leito Fluidizado

As caldeiras de leito fluidizado fazem com que os cavacos de madeira se comportem de forma semelhante a um fluido quando misturado a um mix de gases injetado por baixo do local da combustão, fluindo através da biomassa. Um leito fluidizado é conhecido por fornecer um bom contato de gases e sólidos, com taxas relativamente altas de sólidos e mistura de gases. Essas propriedades tornaram os leitos fluidizados uma tecnologia competitiva em uma ampla variedade de setores industriais, como por exemplo, o de energia (PALLARÈS, 2008).

O sistema de leito fluidizado é composto por três partes: distribuidor de ar, leito de partículas e câmara de expansão ("freeboard"). Muitos sistemas de fluidização podem ser estabelecidos e isso dependerá da velocidade de fluidização do gás. Os regimes mais importantes são o de leito borbulhante e o leito rápido. A primeira geração de caldeiras de leito fluidizado opera no modo de fluidização borbulhante, onde são nomeadas como caldeiras de leito fluidizado borbulhante, LFB ("*Bubbling Fluidized Bed*" - BFB); e a segunda geração opera no regime de fluidização rápida e são conhecidas como caldeiras de leito fluidizado circulante, LFC ("*Circulating Fluidized Bed*" - CFB). Na operação de uma caldeira CFB o ar primário é injetado no fundo do forno, onde o material utilizado no leito normalmente é areia (classificação de Geldart umf=0,12 m/s) ou um material semelhante, devido a sua granulometria proporcionar boas taxas de mistura e contato sólidos/gases (CHÁVEZ, 2017).

Figura 1.12. Esquema de uma caldeira de leito fluidizado borbulhante



Fonte. Adaptado Guarani (2016).

A companhia Guarani (2016) menciona que as caldeiras industriais são cada vez maiores e mais caldeiras de cogeração estão sendo criadas, requerendo maior otimização no desempenho. Uma caldeira industrial de cogeração possui maior diversidade de combustíveis compatíveis, assegurando assim, uma produção contínua em períodos de escassez de combustível usual. Nos últimos anos têm sido construídas caldeiras de leito fluidizado borbulhante para queima de biomassa, com capacidades superiores à 300 ton/h de vapor, quebrando o paradigma de que a melhor opção técnico-econômica para essas capacidades seria a caldeira de leito fluidizado circulante.

1.4.7.3 Pirólise

Método também conhecido como destilação seca da madeira (BRITO, 1990) ou carbonização, a pirólise é o mais simples e mais antigo processo de conversão de lenha em carvão. Este processo consiste em aquecer a madeira, normalmente entre 300°C e 500°C, em ar rarefeito até que os compostos voláteis sejam eliminados. O carvão proveniente da pirólise possui uma capacidade energética duas vezes maior que a madeira crua e queima em temperaturas muito mais elevadas. Além de gás combustível, a pirólise produz alcatrão e ácido pirolenhoso (ANEEL, 2005b). Como a pirólise é caracterizada pela degradação térmica do material orgânico em uma atmosfera com baixa

concentração de oxigênio, tendem a diminuir as emissões de poluentes formados em atmosfera oxidativa, tais como as dioxinas e os furanos (TÔRRES FILHO, 2014).

Decorrente da pirólise da madeira são produzidos diferentes compostos (sólidos, líquidos e gasosos), não apresentando um produto final isolado, ou seja, encontram-se na forma de grupos de compostos. Através da pirólise a celulose é transformada em ácido acético, ácido fórmico, carvão, glicoaldeídos, etc. e a lignina em produtos fenólicos e carvão (ROCHA; PÉREZ; CORTEZ, 2004).

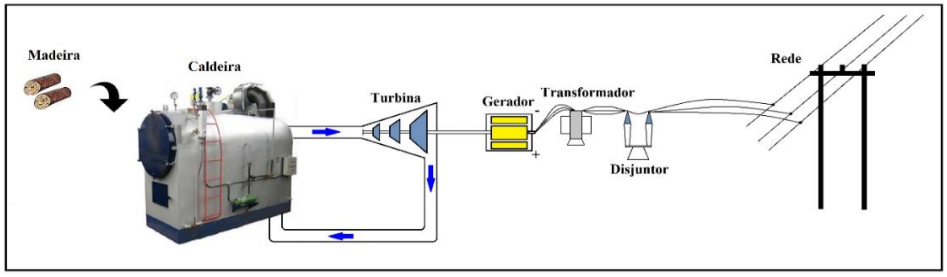
O uso da pirólise é amplo, podendo ser utilizada no reprocessamento de pneus para obtenção de óleos, gases combustíveis e na fabricação de fibra de carbono. Existe também a possibilidade de emprega-la no tratamento dos resíduos sólidos urbanos para a obtenção de biocombustíveis e energia (PENSAMENTO VERDE, 2013).

1.4.7.4 Ciclo termoelétrico a vapor

Uma termelétrica é definida como um conjunto de infraestrutura e equipamentos cuja finalidade é a geração de energia elétrica, sendo que o processo de produção consiste em três fases. Na primeira ocorre a queima de um combustível como óleo, carvão ou gás, transformando a água da caldeira em vapor. Na segunda fase se utiliza o vapor superaquecido que expande o turbo gerador, que por sua vez produz eletricidade. Já na terceira fase o vapor é condensado, transferindo o resíduo da energia térmica para um circuito independente de refrigeração, retornando à água a caldeira e assim, completando o ciclo (PINTO, 2008).

Há também os chamados ciclos combinados que utilizam a turbina a gás; a partir dos gases de exaustão da turbina a gás é produzido vapor que alimenta uma turbina de ciclo a vapor. Este processo não será analisado; para sua utilização com biomassa florestal seria necessário um sistema de gaseificação de biomassa para produção do gás de síntese (basicamente CO e H_2) para ser alimentado na turbina a gás. Atualmente não há sistemas de gaseificação de biomassa acoplados a ciclos combinados (os chamados *Biomass gasification combined cycle* – BIG-CC), pois todas as plantas piloto foram desativadas por problemas técnicos, como pode ser verificado na Task 33 – IEA Bioenergy[7].

Figura 1.13. Funcionamento básico de uma termelétrica.



Fonte. Autor.

O ciclo modelo, em se tratando de usinas termelétricas, é denominado de ciclo *Rankine*. Em sua forma mais básica, consiste em quatro componentes: Uma bomba, um gerador de vapor, uma turbina e um condensador (PANOSSO, 2003). Algumas experiências relacionadas com termoelétricas de pequeno porte estão sendo bem-sucedidas, o projeto ENERMAD é um exemplo. Este projeto foi desenvolvido com o objetivo de instalar caldeiras de

[7] http:/task33.ieabioenergy.com/

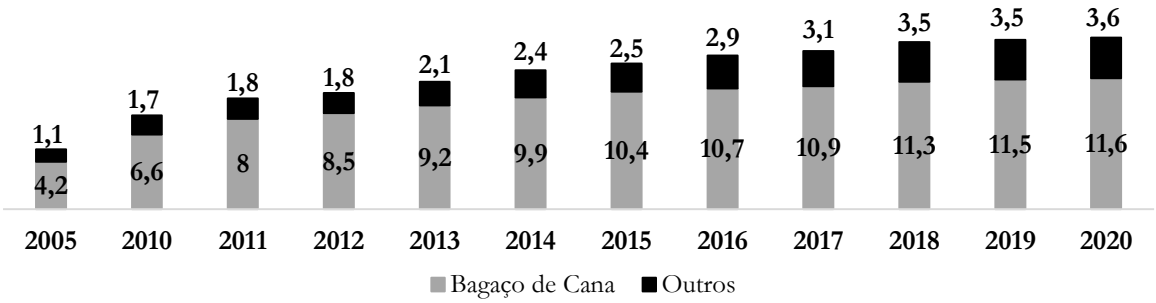
ciclo a vapor de 200 kW em comunidades isoladas da região amazônica, movidas a resíduos de serraria para a geração de eletricidade (MOREIRA et al., 2004).

1.4.7.5 Cogeração e Trigeração

O processo de cogeração consiste na produção combinada de energia elétrica, mecânica e térmica (SANTOS; NOVO, 2008). As centrais desta categoria no país são usualmente encontradas nas indústrias petroquímicas, sucroalcooleiras e de celulose. Em 2007, a cogeração no Brasil respondeu por 3,3% do total, representando 4,4% dos sistemas instalados. Beneficiados pela redução do consumo (diminuição na entrada de combustível) e no aumento da eficiência energética, quem opta pela cogeração acaba contribuindo na redução dos gases do efeito estufa (GEE) (VEIGA, 2007).

De acordo com a COGEN – Associação da Indústria de Cogeração de Energia (2021) o Brasil em 2020 produziu através da cogeração utilizando biomassa 15,2 GW de energia, sendo que as mais utilizadas nas plantas industriais, são: Bagaço de cana (77%), Licor negro (18%) e Res. de Madeira (5%). Os "outros" da Figura 1.14, referem-se a soma da geração de energia produzida através do licor negro, resíduo de floresta, entre outros. O estado de São Paulo é o maior gerador de energia através de biomassa, sendo responsável por 6,1 GW de energia gerada em 2020. O estado do Mato Grosso do Sul e Minas Gerais aparecem em segundo lugar com uma geração de 2,5 GW cada, somando 5 GW.

Figura 1.14. Produção de energia por cogeração, utilizando diferentes fontes de biomassa (GW).



Fonte. (COGEN, 2021).

Os sistemas termoelétricos atuais convertem 33% da energia do combustível em energia elétrica, os outros 66% são perdas sob a forma de calor, assim, faz-se necessário um melhoramento do processo de geração de eletricidade. A cogeração é uma opção real para otimizar o sistema de produção energética, chegando a casa dos 80% de conversão, resultando em um maior benefícios socioeconômicos (FRANÇA; CASEIRO, 2008).

O aproveitamento do potencial da biomassa na geração de energia elétrica dependerá de novas tecnologias de geração em média escala, como gaseificadores de até 10 MW. É importante desenvolver mecanismos que favoreçam a geração distribuída e os excedentes da produção de eletricidade injetado na rede de distribuição. Isso corrobora para a construção de sistemas de cogeração, otimizando os recursos utilizados, pois devido à descentralização da oferta é possível notar um gasto elevado no transporte de biomassa em grandes distâncias quando o sistema é centralizado (MME, 2007).

1.4.8 Parâmetros de Caracterização da Biomassa Florestal para Uso Energético

1.4.8.1 Teor de umidade

Para Timber Queensland (2014) o teor de umidade é o volume de água presente na madeira dividido por sua massa seca e normalmente expresso em percentagem. Este é determinado a partir da diferença do peso úmido (massa inicial) pelo peso seco utilizando uma balança de precisão. Considera-se uma das características mais relevantes ao se utilizar materiais lignocelulósicos para a geração de energia.

Os atributos fisioquímicos que o teor de umidade exerce sobre a madeira devem ser levado em consideração durante todo o seu processamento, acompanhar e analisar suas flutuações é de suma importância para melhorar sua trabalhabilidade e características energéticas, como no caso do carvão vegetal (DONATO, 2013). Esta característica influencia diretamente nos processos termoquímicos (combustão e a pirólise), físicos (densificação para produção de pellets e briquetes) e também biológicos (fermentação). Além disso, é necessário considerar que o poder calorífico dos materiais lignocelulósicos seguem tendências inversamente proporcionais ao conteúdo de água presente (SOUZA et al., 2012).

Estudos realizados por Lundgren, Hermansson e Dahl (2004) demonstraram que quanto maior o teor de umidade mais elevada é a emissão de monóxido de carbono (CO), principalmente no início da combustão. Palacka *et al.* (2017) explicam que devido ao alto teor de umidade na madeira causa um menor aquecimento, concomitantemente há uma maior incidência de combustão incompleta, favorecendo a produção de CO, materiais particulados, fuligem, entre outros. Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT, 2003), através da NBR 14929, determina os testes passíveis de utilização para determinar o Teor de Umidade contido na madeira, sendo calculado pela Expressão 2:

$$U = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (2)$$

U: Teor de umidade (%);
m_1: Massa do recipiente (g);
m_2: Massa úmida (g);
m_3: Massa seca (g);

1.4.8.2 Densidade básica

A densidade é uma propriedade fundamental na determinação da qualidade da madeira e pode variar tanto por questões genéticas, como por questões ambientais (genótipo + ambiente). É também de grande importância para caracterizar madeiras para diversos fins, diretamente correlaciona com as características físicas e mecânicas da madeira (JÚNIOR; GARCIA, 2017). Ao longo dos anos a densidade básica se firmou como um índice que expressa a qualidade da madeira, tal situação ultrapassou os limites, porque muitas vezes a comparação fica inviável. Podem ser citados como fator limitante de comparação a própria variabilidade da densidade ao longo do tronco (lenho de tração e de reação) (FOELKEL; MORA; MENOCHELLI, 1990).

Dentre as várias maneiras de se expressar a densidade da madeira, uma das mais práticas e importante é a densidade básica que relaciona o peso absolutamente seco em gramas ou toneladas e seu volume em centímetros ou metros cúbicos, quando em estado de completa saturação de água (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971).

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, através da NBR 11941 define normas de como proceder as análises de densidade básica. Para cavacos de madeira a presente norma propõe dois métodos de aferição, o de máximo teor de umidade e o de imersão.

O método de máximo teor de umidade (ABNT (2003b) - NBR 11941) consiste em imergir os cavacos em água utilizando um recipiente provido de dispositivo para vácuo (bomba a vácuo ou trompa de água), deve-se manter as amostras imersas até a saturação completa das fibras. Para facilitar a penetração da água é recomendado utilizar vácuo intermitente, variando o tempo de acordo com a espécie testada. Após as amostras atingirem a saturação completa, deve-se remover a água superficial com papel absorvente e pesa-las (balança de sensibilidade 0,1g) em seguida. Feito a pesagem, as amostras são secas em estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 2°C até massa constante e pesadas novamente. Com os dados é possível calcular por meio da Expressão 3:

$$d_b = \frac{1}{\left(\frac{m_1}{m_2}\right) - 0{,}346} \tag{3}$$

Onde:

d_b: Densidade básica da madeira (g/cm^3);

m_1: Massa úmida saturada da amostra (g);

m_2: Massa seca em estufa a (105 ± 2)°C, em gramas

Já o método de imersão é muito parecido com o citado anteriormente, pode ser utilizado cesto de arame ou tela de aço inox e um dispositivo para fixação na balança de precisão para pesar os cavacos saturados de água. Para calcular a densidade básica relacionado a este método, deve prosseguir como mostra a Expressão 4:

$$d_b = \frac{m_3}{(m_2 - m_1)} \tag{4}$$

Onde:

d_b: Densidade básica da madeira (g/cm^3);

m_1: Massa úmida saturada da amostra (g);

m_2: Massa seca em estufa a (105 ± 2)°C, em gramas;

m_3: Massa do recipiente com água (g).

1.4.8.3 Poder calorífico

As principais propriedades para caracterização energética da biomassas são: Poder Calorífico – PC (kJ.kg^{-1} ou Kcal.kg^{-1}), densidade (kg/m^3) e composição química (SILVA; MORAIS, 2008). Resumidamente, o poder calorífico superior ou inferior é o montante de energia térmica desprendida depois do processo de combustão completa por unidade de massa, parâmetro importante para uso dos diversos tipos de combustíveis (biomassa). Referindo-se a madeira, o poder calorífico depende da espécie e de variáveis como a temperatura final da reação (NOBRE et al., 2012).

O poder calorífico é uma das mais importantes propriedades dos combustíveis, normalmente é quantificado pela queima de uma porção conhecida, onde é mensurado o calor liberado da reação. No caso de madeira pode-se encontrar valores desde 3.000 kcal/kg até 5.400 kcal/kg. A resina das árvores possui valor médio de 9.460 kcal/kg e

normalmente, as coníferas apresentam valores mais elevados que as folhosas, pois contém baixo teor de resina (BRITO; BARRICHELO, 1979). O calor liberado pela combustão de uma unidade de massa de um combustível em pressão constante com a água permanecendo no estado de vapor, é denominado de poder calorífico inferior (ARRUDA, 2009).

Como poder calorífico inferior (PCI) considera o teor de umidade da biomassa, deve-se descontar o valor energético utilizado para evaporação da água, por esta razão, é mais adequado na comparação de dados entre amostras (SILVA; MORAIS, 2008). Em média, os resíduos de *Pinus taeda* L. possuem poder calorífico inferior (PCI) de 4.578 kcal/kg (SOUZA et al., 2012) e para o gênero *Eucalyptus* sp. por volta de 4.420 kcal/kg (FOELKEL, 2015).

Devido ao cancelamento da NBR 8633/2014 como metodologia para obtenção do poder calorífico superior (PCS), pode-se optar pela ABNT-NBR 11956/(1990), onde se utiliza uma bomba calorimétrica com bomba de oxigênio (resistente a 20 Mpa), balança analítica (0,0001g) e semi-analítica (0,1 g), aquecedor ou chapa elétrica, estufa (250°C), entre outros materiais. Para calcular o poder calorífico superior através dos dados do ensaio, deve-se proceder conforme Expressão 5:

$$PCS = \frac{(T \times W) - C_1 - C_2 - C_3}{P} \quad (5)$$

Onde:

PCS: Poder calorífico superior (kcal/kg ou cal/g);

T: Diferença entre temperatura final e inicial (°C);

W: Energia equivalente do calorímetro (cal/°C);

C_1: Calor de formação HNO_3 (cal);

C_2: Calor de formação de H_2SO_4 (cal);

C_3: Calor de combustão do fio de ignição (cal);

P: Massa da amostra (g).

1.4.8.4 Teor de cinzas

De acordo com Furtado et al. (2012) o teor de cinzas é expresso em percentagem e representa o conteúdo de material inorgânico presente na madeira. De acordo com Brand (2010) o teor de cinzas pode ser dividido em duas categorias, natural e poluído (ou de contaminação). O natural é derivado de substâncias inorgânicas que estão presentes na fisiologia da planta, já a poluída consiste na incrustação de materiais inorgânicos como terra, areia e pedras, que se agregam na biomassa durante as atividades de colheita e transporte dentro do talhão até a picagem. O teor de cinzas presente na biomassa é inversamente proporcional ao poder calorífico.

Para o teor de cinzas, a NBR 13999/(2017) que está em vigor define métodos para sua determinação em relação a madeira e outros materiais, que basicamente, é a massa de resíduos geradas após incineração em mufla de 525 ±25°C. Os equipamentos necessários para a aferição do teor de cinzas são: cadinho resistente ao calor, mufla (525 ±25°C), balança analítica e dessecador. Sendo assim é calculado pela Expressão 6:

$$TC = \frac{100 \times m_r}{m_s} \quad (6)$$

Onde:

TC: Teor de cinzas (%);

m_r: Massa do resíduo – cinzas (g);

m_s: Massa da amostra (g).

1.4.8.5 Índice de valor de combustível (IVC)

Para uma empresa que utiliza cavacos de madeira como fonte de energia há a necessidade de atestar a qualidade do produto para satisfação dos clientes e estabelecimento dos preços. Um parâmetro que pode ser utilizado para indicar a qualidade desse combustível é o Índice de Valor Combustível (IVC) (SOARES, 2016).

Para que o material lenhoso seja direcionado a energia, algumas características importantes devem ser analisadas, sendo elas: alto poder de combustão, alta densidade, baixo teor de cinzas e baixo teor de umidade. Para melhorar a comparação das características da biomassa florestal Purohit e Natiyal (1987) desenvolveram o Índice de Valor Combustível (IVC) que leva em consideração o poder calorífico, densidade, teor de cinzas e teor de umidade. Assim, é descrito pela Expressão 7:

$$IVC = \frac{PCS \times Db}{TC \times U} \tag{7}$$

Onde:

IVC: Índice de Valor de Combustível;

PCS: Poder Calorífico Superior (KJ/g);

Db: Densidade Básica (g/cm^3);

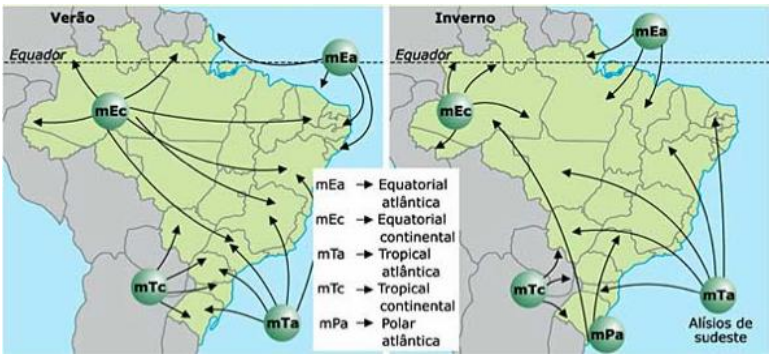
TC: Teor de Cinzas (%);

U: Teor de Umidade (g/g).

1.4.8.6 Nitrogênio e cloro

Com a influência das massas de ar nas florestas brasileiras, principalmente as localizadas no litoral, como é o caso da Mata Atlântica, tendem a possuir uma quantidade elevada de Potássio (Na^+), Cloro (Cl^-) e Magnésio (Mg^{+2}) no conteúdo de sua biomassa. Estes elementos são dominantes nos aerossóis evaporados pelos mares e oceanos, arrastados pelos ventos até se aglutinarem com o vapor emitido pelas florestas, formando precipitações (MELLO, 2001).

Figura 1.15. Dinâmica das massas de ar, solstícios de verão e inverno.



Fonte. http://educacao.globo.com/

A ENplus determina parâmetros para valores toleráveis de emissão de cloro, nitrogênio, cinzas e dimensões aceitáveis de pellets e briquetes. Estes elementos em excesso na biomassa florestal podem causar graves prejuízos ao meio ambiente e a saúde humana (EPC, 2015b).

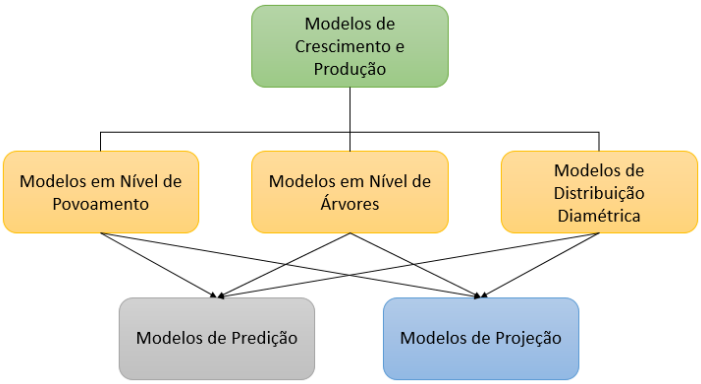
1.4.9 Amostragem e modelos de produção

A amostragem é definida como a coleta de dados da fração de um material/produto (cavaco de madeira, areia para construção, cimento, etc.) ou determinada população (animais, pessoas, plantas, etc.) que possuem características comuns. Faz-se necessário garantir que a amostragem represente o povoamento ou produto como um todo, sendo assim, materiais ou populações heterogêneas necessitam de maior intensidade amostral. No caso de populações (reflorestamentos) homogêneas a coleta de dados não é tão exigente, pelo fato de árvores ou lavoras serem provenientes de melhoramento genético (clones), criando assim, um padrão entre as plantas cultivadas. O processo de amostragem deve ser inconsciente, ou seja, independente de influências, desejos e preferências pessoais (NETTO; BRENA, 1997).

De acordo com Campos e Leite (2009) é denominado "modelo" a relação funcional a ser ajustada sobre dados de uma determinada amostra, sendo assim $Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \varepsilon_i$ é considerado um modelo linear simples. Quando os valores são determinados para cada estimador ($\beta_0 \, e \, \beta_1$) este é chamado de equação. Na mensuração florestal um modelo de crescimento e produção pode ser expresso por um ou mais modelos, equações, tabelas e gráficos, podendo ser incluídas uma o mais variáveis independentes. Para Brito (2005) modelos matemáticos são formulações que simulam um ou mais fenômenos do mundo real, sendo possível realizar predições sobre aspectos de produtividade e crescimento, sendo utilizado nas mais diversas áreas de conhecimento como economia, engenharias, medicina, etc.. A análise futura utilizando modelos matemáticos é uma simplificação dos processos-chave, de forma a ser possível perceber e prever situações da amostragem. Sendo assim, um bom ajuste do modelo é consequentemente um espelho da realidade.

Segundo Scolforo (1998) a modelagem matemática depende diretamente das variáveis envolvidas no ajuste, sendo que os modelos podem ser classificados em: modelos de estimativa ao nível de povoamento (globais), modelos de produção por classe de diâmetro e modelos de árvore individual. Ao nível de povoamento são divididos em modelos de produção normal (completamente estocados: $V = f(I)$), modelos de produção empírica (estático: $V = f(I, S, D)$) e de densidade variável ($V = f(I_1, I_2, D)$).

Figura 1.16. Diferentes modelos quanto sua estrutura e aplicação.



Fonte. Scolforo (1998).

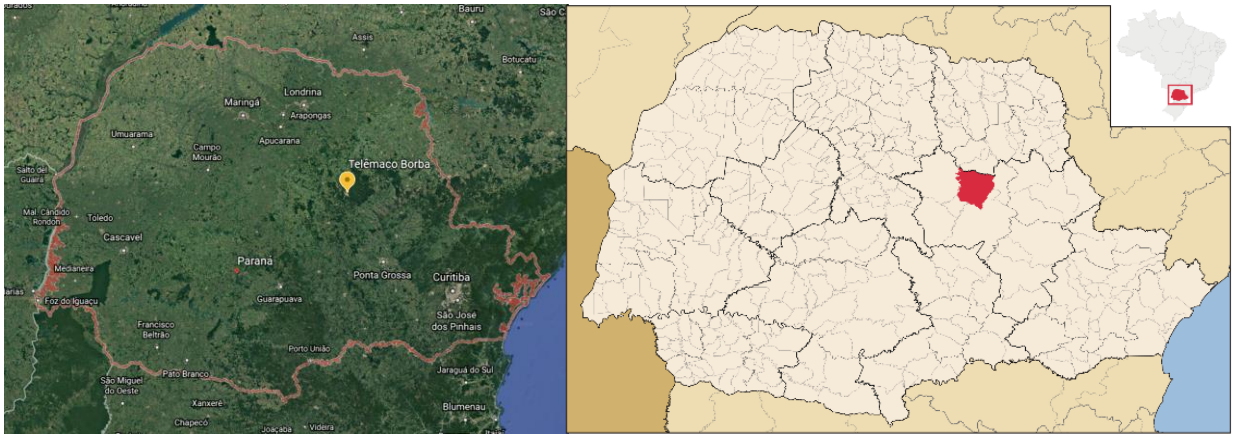
Um dos modos mais antigos de ajustar modelos de produção (estático) ou de crescimento (ao longo do tempo) é denominado de análise de regressão, seu criador foi Sir Francis Galton (1886) no artigo intitulado *"Regression towards medicocrity in hereditary"* onde estudou a influência hereditária de genes ligados a expressão da altura em relação aos seus parentais. De acordo com Chein (2019), utiliza-se a regressão como um instrumento estatístico para simplificar o entendimento de dados e informações. Na análise de regressão, preocupa-se principalmente com a dependência estatística entre variáveis, este método utiliza variáveis aleatórias que possuem uma distribuição de probabilidade. O modo mais básico são os ajustes de modelos de regressão linear simples, sendo expresso por $y = a + bx$, onde y é a variável dependente ou endógena, sendo x explicando o seu comportamento, x é denominado de variável independente ou explicativa. As letras a e b são os estimadores da inclinação da reta de uma amostra aleatória (y e x), fornecendo o efeito em y da mudança unitária em x.

1.5 CARACTERÍSTICA DO LOCAL DO ESTUDO

A Klabin S/A foi fundada em 1899, com 17 unidades industriais no Brasil e uma na Argentina. Com 122 anos no mercado de produtos de base florestal é a segunda maior produtora de celulose do Brasil e a primeira em papel e embalagem. Contando com mais de 25 mil colaboradores em diversos setores direcionado ao mercado de árvores, é a maior produtora e exportadora de papéis do Brasil, sendo a líder nos seguimentos de: papéis, papelão ondulado, embalagens, sacos industriais e cartões para embalagens. A sede da empresa no estado do Paraná está na divisa entre dois municípios, Telêmaco Borba (Figura 1.15) e Guarapuava, sendo que as atividades florestais estão distribuídas em 37 municípios. Esta possui uma área florestal de aproximadamente 400.000 hectares, onde 190.000 são áreas plantadas e por volta de 210.000 são de florestas nativas (KLABIN, 2019).

O clima predominante da região é subtropical transicional para o temperado, úmido, mesotérmico, sem estação seca definida (Cfa/Cfb) segundo classificação de *Köppen* e *Geiger*. O verão é quente com temperaturas variando em torno dos 19°C, tendendo à uma concentração de chuvas em média de 1.437 mm/ano e durante o inverno, apesar da pouca frequência, ocorre a formação de geadas (POSTO METEOROLÓGICO USP/ESALQ, 2021).

Figura 1.17. Mapa do Paraná - Telêmaco Borba.



Fonte. Google Earth (2021) / Paraná MesoMicroMunicip.svg (2006).

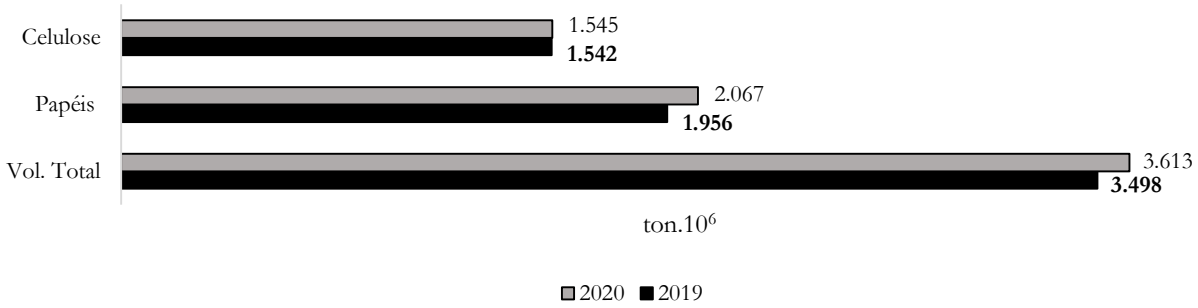
A região onde a empresa está localizada é considerada o polo madeireiro paranaense, também conhecido como Distrito Industrial. Observando um cenário favorável no setor de energia, a Klabin criou o setor de biomassa residual. Este setor é responsável por traçar estratégias de utilização da biomassa residual na produção de energia térmica e elétrica. A maior parte da energia produzida é consumida pela própria planta, sendo a Klabin a segunda maior produtora de energia elétrica utilizando biomassa do Brasil, chegando ao montante de 514.877 kW (ANEEL/SIGA, 2021).

Figura 1.18. Companhia Klabin, unidade Telêmaco Borba/PR.

Fonte. Klabin.com.br.

A produção total da companhia foi de 3.613 milhões de toneladas em 2020, aproximadamente 3,2% maior se comparado a 2019. A produção de celulose não apresentou grandes diferenças entre o mesmo período, mas houve um acréscimo de 5,4% em relação a produção de papel entre 2019 e 2020. Devido ao aumento do preço da celulose, se comparado ao terceiro trimestre de 2020, 2021 apresenta um aumento de 9% no seu valor de mercado, indicando possível recuperação do mercado diante a epidemia de COVID-19 (KLABIN, 2019, 2021).

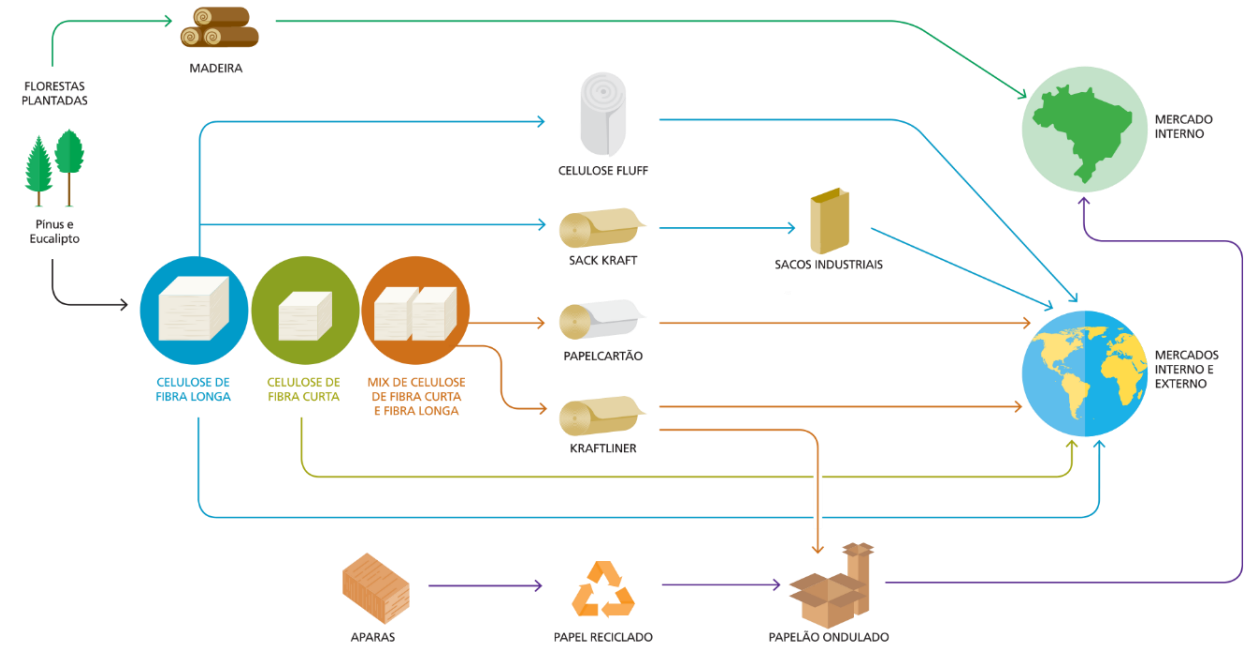
Figura 1.19. Comparativo da produção em milhões de toneladas de celulose e papéis, entre os anos de 2019-2020.



Fonte. (KLABIN, 2019, 2021).

Os reflorestamentos da Klabin são 100% certificados pela FSC (*Forest Stewardship Council*), ou seja, a madeira é proveniente de florestas sustentáveis com espécies de rápido crescimento (Pinus e Eucalipto). O fluxograma da Figura 1.20 identifica cada etapa da produção da empresa, iniciando no campo com reflorestamentos, obtendo matéria-prima direcionada para a fabricação de celulose de fibra curta (Eucalipto) e longa (Pinus). Através da celulose de fibra longa, de fibra curta e o "*mix*" entre elas, são fabricados os seguintes produtos: celulose "*Fluff*" (longa), "*Sack Kraft*" (longa), papel cartão ("*mix*"), "*Kraftliner*" ("*mix*") (KLABIN, 2017).

Figura 1.20. Fluxograma da cadeia produtiva florestal da companhia Klabin S/A.



Fonte. (KLABIN, 2017).

Os produtos especificados na Figura 1.20 são exportados para mais de 69 países, além de atender ao mercado brasileiro. O produto da fabricação da empresa é destinado, principalmente, a industrias dos segmentos alimentícios, saúde, higiene, construção civil. Se comparado o período de 2016 a 2018, as exportações da empresa

Klabin tiveram um acréscimo de 16,7% (KLABIN, 2018). Na Figura 1.21 constam todos os países onde a empresa Klabin mantém relações econômicas, sendo os maiores compradores os mercados chinês e americano.

Figura 1.21. Países que compram celulose da empresa Klabin S/A.

Fonte. (KLABIN, 2017).

1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS - CAPÍTULO 1

Com a aplicação de novas tecnologias no setor florestal houve um aumento significativo na eficiência energética, sendo possível vislumbrar um futuro voltado a fontes renováveis em substituição aos combustíveis fósseis. A questão central é que não existe um sistema de geração de energia ou um combustível melhor que outro entre os renováveis e sim o mais adequado para cada microrregião, ou até mesmo a combinação entre eles, como é o caso das "*smartgrids*" que consiste na geração de energia por múltiplas fontes renováveis como é o caso da eólica, solar, hidráulica, biomassa, entre outras. No caso da utilização da madeira como combustível, regiões e companhias que possuem reflorestamentos podem ser centros de geração e cogeração, objetivando a comercialização de energia tanto em áreas florestais dedicadas como resíduos de colheita, que por muitas vezes não são aproveitados.

A presente tese procurou entender a dinâmica do cavaco de madeira na cogeração de energia dentro de uma empresa do setor florestal paranaense (Klabin), este combustível é proveniente de árvore inteira (áreas dedicadas) e resíduos florestais. Os próximos capítulos abordarão a relação entre teor umidade e densidade do cavaco armazenado no campo (recém processado) e estocado no pátio da empresa. Foi possível entender o processo de mensuração do coproduto, objetivando a predição do montante de cavaco produzido por meio de modelos matemáticos, ajudando assim, na análise de disponibilidade energética para estratégias futuras. Justifica-se a execução deste trabalho pela busca da otimização da utilização de resíduos florestais, bem como demostrar o seu potencial energético.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 11956 - Coque: determinação do poder calorífico superior**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/>.

ABNT. **NBR 14929 - Madeira: determinação da umidade da madeira.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2003a. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/>.

ABNT. **NBR 11941 - Madeira: determinação da densidade básica.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003b. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/>.

ABNT. **NBR 13999 - Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

ABRAF. **Anuário Estatístico ABRAF 2013**. Brasília - DF: ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, 2013. Disponível em: <http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-abraf13-br.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2018.

ANDREUCCETTI, M. T. **Caracterização do licor negro de Eucalipto na etapa de evaporação e correlação das suas propriedades**. Campinas, SP: UNICAMP, 2010.

ANEEL/SIGA. **SIGA – Sistema de Informação de Geração da ANEEL**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 12 abr. 2021.

ANEEL. **Por dentro da conta de luz: informação de utilidade pública.**Brasília - DF, 2005a. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Cartilha_tarifas_Enersul.pdf>

ANEEL. Biomassa. **Atlas de energia elétrica no Brasil**, v. 5, p. 77–92, 2005b.

ANEEL. **Por Dentro da Conta de Luz.**Brasília-DF, 2016. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Por+dentro+da+conta+de+luz/9b8bd858-809d-478d-b4c4-42ae2e10b514>

ANEEL. **INFORMAÇÕES GERENCIAS.Capacidade instalada.** DF, Brasil.: ANEEL, 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informações+Gerenciais+-+1º+trimestre+de+2019/b860054f-79ec-6608-951a-fb2288701434>. Acesso em: 10 jun. 2019.

ANGELSEN, A. et al. Environmental Income and Rural Livelihoods: A Global-Comparative Analysis. **World Development**, v. 64, n. S1, p. S12–S28, 2014.

APRE/KLABIN. **Estudo Setorial - Biocombustíveis.**Curitiba-PR, Brasil, 2020. Disponível em: <https://apreflorestas.com.br/wp-content/uploads/2020/12/estudo_setorial_alta.pdf>

ARRUDA, M. Z. DE. **Análise de combustíveis de caldeiras**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2009.

BANDEIRA, F. DE P. M. **Redes de Energia Elétrica Inteligentes (Smart Grids).** Brasília - DF: Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados, 2012. Disponível em: <file:///C:/Users/user/Downloads/redes_energia_bandeira.pdf>.

BITTENCOUR, L. P.; OLIVEIRA, G. B. DE. A indústria madeireira paranaense nos anos recentes. **Revista das Faculdades Santa Cruz**, v. 7, n. May, p. 33–42, 2009.

BLASELBAUER, H. Combustão de madeira e controle de poluição em cerâmicas. **Revista Novacer**, v. 5, p. 6, 2010.

BRAINER, M. S. DE C. P. Área Mundial De Florestas Plantadas. 6. p. 1–11, 1 fev. 2021.

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

BRITO, C. C. R. DE. **Novos Modelos de Crescimento Resultantes da Combinação e Variações dos Modelos de Chapman- Richards e Silva-Bailey, Aplicados em Leucena [Leucaena leucocephala (Lam) de Wit] E Tubarão- Junteiro (Carcharhinus porosus)**. Recife, PE, Brasil: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2005.

BRITO, J. O. **Princípios de Produção e Utilização de Carvão Vegetal de MadeiraDocumentos Florestais**. Piracicaba - SP: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1990. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/docflorestais/cap9.pdf>.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Usos Diretos e Propriedades Da Madeira Para Geração De Energia. **IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos FLorestais**, v. 52, n. 1, p. 7, 1979.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal perguntas e respostas**. 3 edição ed. Viçosa, MG, Brasil: Editora UFV, 2009.

CARREIRO, M. R. DE M. **Análise Exergética e Ambiental do Processamento do Licor Negro Gerado em Fábricas de Celulose e Papel**. Itajubá: UNIFEI, 2009.

CASTRO, H. F. Apostila: Processos Químicos Industriais II - PAPEL E CELULOSE. In: USP/EEL (Ed.). . **EEL-USP**. 1. ed. Lorena-SP, Brasil: Escola de Engenharia de Lorena, 2009. p. 30.

CEPEA/USP. PIB do Agronegócio Alcança Participação de 26,6% no PIB Brasileiro em 2020. 1. p. 18, 10 mar. 2021.

CHÁVEZ, J. G. V. **Modelagem de um Leito Fluidizado Borbulhante de Grande Escala para Combustão de Biomassa**. Campinas, SP: Universidade de Campinas - UNICAMP, 2017.

CHEIN, F. **Introdução aos modelos de regressão linear: um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas**. Brasil: Brasília..

COGEN. **Evolução da Capacidade Instalada de Biomassas (Cogerção)**. Disponível em: <https://www.cogen.com.br/cogeracao/cogeracao-no-brasil/biomassa>. Acesso em: 6 maio. 2021.

CORDEIRO, I. M. C. C.; BARROS, P. L. C. DE; COIMBRA, L. DE A. Aproveitamento dos Resíduos Lenhosos: Uma Alternativa Sustentável Para Projetos de Manejo Florestal. **Forum Internacional de Resíduos Sólidos**, v. 9, p. 1–7, 2018.

DONATO, D. **Métodos de Amostragem e de Determinação do Teor de Umidade da Madeira em Tora**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2013.

EMBRAPA. **Briquetagem e Peletização de Resíduos Agrícolas e Florestais**: 1.Brasília - DF, 2012. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/932713/1/FOLDERBriquetagem22012.pdf>

EPC. **Quality Certification Scheme For Wood Pellets.European Pellet Council**. Bélgica: European Pellet Council (EPC), 2015a. Disponível em: <https://www.enplus-pellets.eu/en-in/resources-en-in/technical-documentation-en-in.html#handbook>. Acesso em: 12 maio. 2019.

EPC. **Quality Certification Scheme For Wood Pellets.European Pellet Council**: Part 3. Bélgica, Europe: European Pellet Council (EPC), 2015b. Disponível em: <https://enplus-pellets.eu/en-in/component/attachments/?task=download&id=103>. Acesso em: 5 mar. 2020.

EPC. **Report Pellet. Statistical Report**. Bélgica: European Pellet Council (EPC), 2019. Disponível em: <https://epc.bioenergyeurope.org/wp-content/uploads/2020/02/SR19_Pellet_final-web-1.pdf>.

EPE. **Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese: ano base 2017.** Rio de Janeiro, RJ.: Ministério de Minas

e Energia, 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relatório Síntese 2018-ab 2017vff.pdf>.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2020 - Relatório Síntese - ano base 2019.Ministério de Minas e Energia**: 1. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>.

ESCOBAR, J. F. **A produção sustentável de biomassa florestal para energia no Brasil: O caso dos pellets de madeira**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016.

EUROPEAN PELLET COUNCIL. **Pellet Market Overview**: Statistical Report. Europa: European Biomass Association, 2017. Disponível em: <https://epc.bioenergyeurope.org/wp-content/uploads/2017/10/FINAL-PELLET-MARKET-OVERVIEW-2017.pdf>.

FAO. **FRA 2015 - Terms and Definitions.**: 1. Roma, Itália: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015a. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ap862e/ap862e00.pdf>.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2015: Desk Reference**. Roma, Itália: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015b. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018.

FAO. **Forest Products, Annual Market Review, 2018-2019.UNECE**. Roma, Itália: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019. Disponível em: <https://unece.org/DAM/timber/publications/SP48.pdf>.

FAO STATISTICS. **World Food and Agriculture - Statistical Pocketbook 2020.The Lancet**. Roma, Itália: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/3/cb1521en/CB1521EN.pdf>.

FAO; UNEP. **The State of the World's Forests 2020**: Forests, biodiversity and people. Rome, Itália: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/ca8642en>.

FERNANDES, U.; COSTA, M. Potential of biomass residues for energy production and utilization in a region of Portugal. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 5, p. 661–666, 2010.

FOELKEL, C. **Eucalyptus Newsletter nº 49 – Novembro de 2015.** São Paulo: Eucalyptus Online Book and Newsletter, 2015. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/artigos/news49_Biomassa_Florestal_Eucalipto.pdf>.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos FLorestais**, p. 65–74, 1971.

FOELKEL, C.; MORA, E.; MENOCHELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. **6 Congresso Florestal Brasileiro**, v. 6, n. 1, p. 719–727, 1990.

FONTES, P. J. P. DE. **Auto-Suficiência Energética Em Serraria de Pinus e Aproveitamento dos Resíduos**. Curitiba - PR: Universidade Federal do Paraná, 1994.

FRANÇA, A. F. R. T.; CASEIRO, L. P. V. DA C. **Planejamento e Produção de Eletricidade.Cogeração e Trigeração.** Bahia, Brasil: Departamento de Engenharia Eletrônica e de Computação (DEEC), 2008. Disponível em: <http://www.mariloureiro.net/tecnica/co-trigeracao/Trigeracao.pdf>.

FRIBUSH, D.; PARKER, S.; ENTERLINE, S. **Electric Evolution: Issues Posed and Opportunities Presented by the Emergence of the Smart Grid**. Vermont, USA: Vermont Energy: Investment Corporation, 2010. Disponível em: <https://www.veic.org/documents/default-source/resources/reports/smart-grid.pdf>.

FURLAN, C. M. **V Votânica no Inverno**. 5. ed. São Paulo: Instituto de Biociências - USP, 2015.

FURTADO, T. S. et al. Correlação Entre Teor de Umidade e Eficiência Energética de Resíduos de Pinus taeda em Diferentes Idades. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 577–582, 2012.

GALTON, F. Regression Towards Mediocrity in Hereditary Stature. **The Journal of the Anthropolical Institute of Great Briatain and Ireland**, v. 15, p. 246–263, 1886.

GARCIA, D. P. **Produção de pellets no Brasil.Histórico da produção de pellets no Brasil**. Brasil: Mercado de Pellets, 2018. Disponível em: <http://pelletsdemadeira.blogspot.com/2018/03/producao-de-pellets-no-brasil-so.html>. Acesso em: 11 jun. 2019.

GARCIA, D. P. et al. Mapa dos produtores brasileiros de biocombustíveis pellets. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 12, n. 4, 2021.

GONÇALVES, J. E. **Caracterização Química e Energética de Briquetes Produzidos com Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos e Madeira de Eucalyptus grandis**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2006.

GUARANI. **Caldeira de Leito Fluidizado X Grelha**. Olímpia, SP., Brasil: Tereos Açúcar e Energia, 2016. Disponível em: <https://docplayer.com.br/72112094-Caldeira-de-leito-fluidizado-x-grelha.html>.

IBÁ. **Relatório 2017 - Indústria Brasileira de Árvores**. São Paulo, SP: Indústria Brasileira de Árvores, 2017. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2018.

IBÁ. **Relatório Anual 2019 - Indústria Brasileira de ÁrvoresRelatório**. Brasilia-DF, Brasil: Indústria Brasileira de Árvores, 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>.

IBÁ. **Relatório Anual 2020 - Indústria Brasileira de Árvores**: 1. Brasilia-DF: Indústria Brasileira de Árvores, 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>.

ILUMINA. **Temos agências reguladoras?** Disponível em: <http://www.ilumina.org.br/temos-agencias-reguladoras-artigo/#_ftn2>. Acesso em: 21 jun. 2021.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Energy Cost Analysis: Biomass for Power GenerationInternational Renewable Energy Agency (IRENA)**, 2012. Disponível em: <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-BIOMASS.pdf>

JORGE, I. **Estudo Sobre a Extração De Lignina Do Licor Negro, Seu Impacto No Processo De Recuperação E Geração De Energia E Seu Potencial Uso Em Novas Aplicações**. Curitiba, PR, Brasil: Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, 2018.

JÚNIOR, L. S.; GARCIA, J. N. Densidade básica da madeira de eucalipto. **Simpósio Científico Dos Pós-Graduandos Do Cena**, p. 13820, 2017.

KLABIN. **Relatório de Sustentabilidade**. Disponível em: <https://rs2017.klabin.com.br/a-klabin/>. Acesso em: 13 jul. 2021.

KLABIN. **Relatório de Sustentabilidade**. Disponível em: <https://rs2018.klabin.com.br/competitividade-e-resultados/>. Acesso em: 14 jul. 2021.

KLABIN. **Histórico klabin**. Disponível em: <https://www.klabin.com.br/>. Acesso em: 12 jun. 2019.

KLABIN. **Relatório Trimestral 4T20**. Telêmaco Borba - PR: [s.n.]. Disponível em: <https://klabin.com.br/wp-content/uploads/2021/02/klabin-release-4t20_por_vf.pdf>.

LENTINI, M.; SOBRAL, L.; VIEIRA, R. Como o mercado dos produtos madeireiros da Amazônia evoluiu nas últimas duas décadas (1998-2018)? **Imaflora**, n. 2, 2020.

LIZ, G. M. M. **Estudo Teórico de um Dispositivo de Captação de Energia das Ondas**. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2017.

LUNDGREN, J.; HERMANSSON, R.; DAHL, J. Experimental studies of a biomass boiler suitable for small district heating systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 5, p. 443–453, 2004.

MACHADO, L.; OLIVEIRA, M. M. DE; SILVA, V. B. E. **Ocorrência de uma espécie de besouro (Cerambycidae: Ibidionini) como uma nova praga para a Citricultura Paulista**. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/agrolinkfito/artigo/ocorrencia-de-uma-especie-de-besouro--cerambycidae--ibidionini--como-uma-nova-praga-para-a-citricultura-paulista_57716.html>. Acesso em: 11 jun. 2021.

MATTOS, J. R. **Espécies de Pinus Cultivados no Brasil**. Grupo Edit ed. São Paulo, Brasil: Grupo Editorial Chácaras e Quintais, 1980.

MELLO, W. Z. DE. Precipitation chemistry in the coast of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, Brazil. **Environmental Pollution**, v. 114, n. 2, p. 235–242, 2001.

MME. **Plano Nacional de Energia 2030: Geração termelétrica - Biomassa.**: Plano Nacional de Energia 2030.Brasilia, DF, Brasil, 2007. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_8.pdf>

MOREIRA, J. R. et al. **Enermad**. São Paulo, SP, Brasil: Projeto Enermad, 2004. Disponível em: <http://143.107.4.241/projetos/enermad/enermad.htm>. Acesso em: 26 jan. 2019.

MOREIRA, N. J. H. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012.**Brasil, BrasilAgência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, , 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>

NETTO, S. P.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. 1. ed. Curitiba, PR, Brasil: Câmara Brasileira de Livros, 1997.

NOBRE, J. R. C. et al. Determinação Do Poder Calorífico Superior De Resíduos Da Indústria Madeireira Da Amazônia E Dos Carvões Sob Diferentes Indústria Madeireira Da Amazônia E Dos Carvões Sob Diferentes Temperaturas De Carbonização. **EnerBiomassa**, n. November, p. 14, 2012.

OLIVEIRA, C. M. DE. **Conjuntura Nacional e Internacional Setor Industrial de Biomassa Pellets Briquetes**. Curitiba - PR, Brasil: Instituto Brasileiro Pellets Biomassa Briquetes, 2019.

PALACKA, M. et al. The Energy Characteristics of Different Parts of the Tree. **Procedia Engineering**, v. 192, p. 654–658, 2017.

PALLARÈS, D. **Fluidized bed combustion – modeling and mixing**. [s.l.] CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2008.

PALMER, D., TUBBY, I., HOGAN, G.AND ROLLS, W. **Biomass heating : a guide to feasibility studies Introduction to feasibility studies**. UK, England: Biomass Energy Center, 2011. Disponível em: <http://www.districtheatingscotland.com/wp-content/uploads/2015/12/BiomassHeatingAGuideToFeasibilityStudies.pdf>.

PANOSSO, G. C. **Métodos de Simulação para Ciclo de RANKINE**. Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

PEDROSA-MACEDO, J. H. **Manual de Pragas em Florestas**. 2. ed. Viçosa, MG: Programa Cooperativo de Monitoramento de Insetos em Florestas, 1993.

PENSAMENTO VERDE. **Conheça o processo de pirólise do lixo**. Disponível em: <https://www.pensamentoverde.com.br/reciclagem/conheca-o-processo-de-pirolise-do-lixo/>. Acesso em: 12 jun. 2019.

PIGHINELLI, A. L. **Pesquisa e setor produtivo debatem diversificação de produtos de celulose**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2683859/pesquisa-e-setor-produtivo-debatem-diversificacao-de-produtos-de-celulose>. Acesso em: 11 jun. 2019.

PINTO, C. C. L. P. **Usinas Termelétricas**. Vitória, ES: Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo, 2008. Disponível em: <https://lbueno.files.wordpress.com/2008/06/termeletricas.pdf>.

POSTO METEOROLÓGICO USP/ESALQ. **Posto Meteorológico USP/ESALQ**. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/posto/>.

PUROHIT, A. N.; NAUTIYAL, A. R. Fuelwood value index of indian mountain tree species. **International Tree Crops Journal**, v. 4, n. 2–3, p. 177–182, 1987.

QUÉNO, L. R. M. **Produção de pellets de madeira no Brasil: estratégia, custo e risco de investimento**. Brasília - DF: Universidade de Brasília, 2015.

ROCHA, J. D.; PÉREZ, J. M. M.; CORTEZ, L. A. B. **Aspectos Teóricos e Práticos do Processo de Pirólise de BiomassaEnergia na Indústria de Açúcar e Álcool**. Itajubá: Energia na Indústria de açúcar e álcool, 2004. Disponível em: <https://nest.unifei.edu.br/portugues/pags/novidades/curso_cyted/files/pdf/Tema 2 - Processos e Tecnologias para a Conversao do Bagaco em Energia e Combustiveis/Pirolise.pdf>.

SANSIGOLO, C. A. et al. **Nutrição Mineral de Eucalyptus, Pinus, Araucaria e Gmelina no Brasil**. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1983.

SANTOS, F. B. DOS; NOVO, L. M. A. **Fundamentos Teóricos Relacionados À Cogeração E O Exemplo Da Central De Cogeração Infoglobo**. Rio de Janeiro, RJ: Escola Polit[ecnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

SCHÜRHAUS, P. **Produtos e Propriedades Energéticas da Madeira**. União da Vitória, PR, Brasil: Centro Universitário de União da Vitória - UNIUV, 2007. Disponível em: <www.hasten.eng.br>.

SCOLFORO, J. R. S. **Modelagem e crescimento e produção de florestas plantadas e nativas - Biometria Florestal**. Lavras, MG, Brasil: UFLA/FAEPE, 1998.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Recursos florestais. **Boletins do SNIF - Sistema Nacional de Informações Florestais**, v. 1, n. 2, p. 22, 2016.

SILVA, M. B.; MORAIS, A. DOS S. Avaliação Energética do Bagaço de Cana em Diferentes Níveis de Umidade e Graus de Compactação. **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, p. 9, 2008.

SINDAT/ONS. **Mapa linhas de transmissão**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: 3 abr. 2021.

SOARES, J. M. **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE TRÊS DIFERENTES TIPOS DE CAVACOS DE MADEIRA DO HÍBRIDO Eucalyptus urophila x grandis**. Curitiba, PR, Brasil: Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2016.

SOUZA, M. M. DE et al. Estimativa de Poder Calorífico e Caracterização para uso Energético de Resíduos da Colheita e do Processamento de Pinus taeda. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325–334, 2012.

TÔRRES FILHO, A. **Aplicação do processo de pirólise para valoração, cogeração de energia e tratamento de resíduos**. Belo Horizonte - MG: UFMG, 2014.

VEIGA, T. P. Projeto de uma planta de cogeração para um hospital. p. 10, 2007.

VOGEL, M. **Heating with wood: Principles of combustionMontguide…**Montana USAMontana State University, , 2005. Disponível em: <http://agris.fao.org/agris-search/search/display.do?f=1986/US/US86143.xml;US8610203>

WHITE, E. M. **Woody biomass for bioenergy and biofuels in the United States - A briefing paper** (USDA, Ed.)**General Technical Report**USAForest Service, , 2010. Disponível em: <https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr825.pdf>

WIECHETECK, M. **Aproveitamento de Resíduos e Subprodutos Florestais, Alternativas Tecnológicas e Propostas de Políticas ao uso de Resíduos Florestais para Fins Energéticos**Curitiba - PR, 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033501.pdf>

2. ANÁLISE DE CAVACO RESIDUAL NO CAMPO E NO PÁTIO DA EMPRESA DESTINADO A GERAÇÃO DE ENERGIA

RESUMO

Com o aparecimento de novas tecnologias para o processamento da biomassa residual, houve um aumentando significativamente na eficiência energética das empresas, sendo que atualmente muitas utilizam desta matéria-prima para suprimento de energia em suas linhas de produção, obtendo retorno financeiro e destinando corretamente seus resíduos. O ganho ambiental de utilizar os resíduos abandonados no campo e entender a sua dinâmica, faz com que sejam desenvolvidos setores específicos para biomassa residual, criando novos empregos e desenvolvendo a economia local. O sistema de aproveitamento de resíduos de colheita da companhia estudada é usar como fonte de energia o "coproduto", este é formado pelos galhos, somados ao volume da ponteira que posteriormente é cavaqueado para queima em caldeira. O presente capítulo tem por finalidade a busca do entendimento das características e da dinâmica do cavaco residual direcionado a cogeração de energia dentro de uma empresa do setor florestal paranaense. Foram coletadas 27 amostras de cavaco divido em 9 tipos, em 3 locais distintos e em 3 alturas diferentes da pilha. Houve diferença estatística entre as densidades do cavaco do campo, do pátio próprio e do pátio de terceiros. Sendo que as maiores densidades estão no campo, onde comparando com a densidade do cavaco de terceiros há uma diferença de 9,5%. Os cavacos de maiores densidades concentraram-se em sua maioria no topo da pilha, 2,8% maior que no meio e 0,5% maior que na base da pilha. A granulometria do cavaco foi maior no campo que no pátio da empresa (próprio e terceiro) e os resíduos indesejados no cavaco do campo (finos de madeira, terra e casca) foram 17% menores que o cavaco estocado, ou seja, há uma quantidade de finos de madeira, terra e casca maior no pátio que no campo. Os cavacos com menores dimensões (finos: < 4mm) estão localizados, em sua maioria, no meio e na base da pilha, sendo 6% e 4% maior que no topo, respectivamente. Os cavacos de maiores dimensões (25mm) estão presentes no topo da pilha, sendo que a base da pilha possui 11% a menos deste tipo de cavaco. O cavaco do campo apresentou maiores quantidades de terra que os demais e o cavaco de terceiros a maior quantidade de casca. Com a possibilidade das cascas do Eucalipto causarem danos aos equipamentos ao chegarem à fábrica devido a sua alta resistência a tensão, sugere-se que estes resíduos de casca sejam picados com um equipamento específico para que sejam utilizados na implementação de florestas, incorporando-o no solo devido ao seu alto teor de cálcio e magnésio.

Palavras-chave: Florestal; Biomassa Residual; Umidade; Densidade Básica.

ABSTRACT

With the emergence of new technologies for the processing of residual biomass, there has been a significant increase in the energy efficiency of the companies, many use this raw material to supply energy in their production lines, obtaining financial gains and correctly allocating of the residual biomass. The environmental gain of using residual biomass abandoned in the field and understanding your dynamics, this will help create new sectors in forestry companies for residual biomass, creating new jobs and developing the local economy. The residual harvest biomass that remains in the field is called a "co-product", which is formed by the branches, added to the volume of the top of the tree, which is later chipped for burning in a boiler. The purpose of this chapter is to understand the characteristics and dynamics of the residual wood chip directed to energy cogeneration within a company in the forestry sector of Paraná - Brazil. 27 wood chip samples were collected divided into 9 types, in 3 different locations and at 3 different heights of the wood chip pile. There was a statistical difference between the wood chip densities (wood chips collected in the field, in the company's stock and purchased outside). Since the highest densities are in the field, where compared to the density of wood chip purchased outside there is a difference of 9.5%. The highest density wood chips were mostly concentrated at the top of the pile, 2.8% higher than in the middle and 0.5% higher than at the bottom of the pile. The wood chip granulometry was higher in the field than purchased outside and the unwanted residues in the field wood chips (fine wood, dirt and bark) was 17% lower than the stored, in other words, there is a high amount of fine wood, dirt and bark in the company's stock than in the field. Smaller wood chips (fine: < 4mm) are mostly located in the middle and bottom of the pile, being 6% and 4% larger than at the top, respectively. The largest wood chips (25mm) are present at the top of the pile, and the base of the pile has 11% less of this type of chip. The wood chip collected in the field showed large amounts of dirt compared to the others and the wood chip purchased outside the company has the largest amount of bark. With the possibility of Eucalyptus bark causing damage to equipment when arriving at the company due to high resistance to tension, it is suggested the bark residues be chopped with specific equipment in the field, where they can be used in the implementation of forests, incorporating it into the soil due to its high content of calcium and magnesium.

Keywords: Forestry; Residual Biomass; Moisture Content; Basic Density.

2.1 INTRODUÇÃO

A biomassa é uma das mais importantes fontes de energia enquadrada como renovável juntamente com a hidráulica, solar e a eólica, compondo as principais fontes "verdes" na produção energética mundial. A matriz energética brasileira baseia-se, principalmente, nas hidrelétricas e PCH's[8], destacando-se por uma produção energética com emissão de gases do efeito estufa quase nula. A maior problemática das hidrelétricas é a exigência de grandes áreas inundadas que com o passar dos anos se tornaram escassas, além de haver um grande impacto ambiental e interferência em comunidades locais, dificultando a realização de novos projetos (ESPER, 2016).

O Brasil possui riquezas de recursos naturais incalculáveis, com grande extensão de área se comparado aos outros países, favorecendo o investimento no agronegócio. O setor industrial depende de energia para o seu funcionamento, necessitando não somente de energia elétrica em seus processos, mas como de energia térmica. Além da biomassa proveniente de florestas energéticas (Eucalipto e Pinus), a biomassa residual é uma forma barata e acessível para empresas do segmento florestal devido à facilidade e baixo custo de obtenção.

De acordo com Lauri *et al* (2014) a biomassa florestal pode ser dividida em três grandes grupos, a biomassa do tronco (direcionada a indústria moveleira, papel e celulose, caixarias, embalagens, etc.), a biomassa dos galhos (energia: pellets e briquetes) e a biomassa de folhas e raízes (normalmente mantidas a campo para a manutenção da estrutura do solo). Na União Europeia os subprodutos da indústria florestal e resíduos de madeira compõem a maior parte do suprimento de madeira para energia.

A Indústria Brasileiro de Árvore – IBÁ afirma que no Brasil os reflorestamentos ajudam a diminuir a pressão exercida sobre as florestas nativas, principalmente adotando práticas que otimizem o processo e a utilização dos resíduos do segmento florestal (IBÁ, 2020). Os métodos arcaicos de descarte da biomassa residual são extremamente prejudiciais ao meio ambiente, sendo o mais comum a queima a céu aberto, interferindo diretamente na qualidade do ar. A combustão direta ao ar livre aumenta as emissões de material particulado junto a resíduos de fuligem e outros químicos nocivos à saúde. Ao optar por um método de descarte que atenda as especificações ambientais, muitas vezes é necessário a destinação de recursos financeiros que pode inviabilizar economicamente o processo (EPE, 2018).

Mesmo não recebendo o destaque merecido, a biomassa florestal é uma das fontes mais promissoras na geração de energia em território brasileiro. Para promover seu desenvolvimento pesquisas pertinentes ao assunto devem ser realizadas em nível nacional, destacando a importância dos reflorestamentos. O ganho social no aproveitamento de resíduos florestais vem desde a geração de empregos, incluindo novas empresas no setor de bioenergia e até mesmo na melhora da qualidade do ar em sítios industriais. Outro ponto a ser destacado é o ganho ambiental em termos de área disponível, onde esses resíduos seriam acumulados no pátio da indústria e/ou direcionados a aterros. Outra importante vantagem é com relação a comercialização dos créditos de carbono e a geração de energia a partir destes resíduos, sendo ambos geradores de receita (BRAND et al., 2014).

O presente capítulo tem por finalidade a busca do entendimento da dinâmica do cavaco residual direcionado a cogeração de energia dentro de uma empresa (Campo e Pátio) do setor florestal paranaense. Onde será analisado o teor de umidade do cavaco, densidade e granulometria desta biomassa residual transformada em cavaco, tanto produzido no campo como estocado no pátio.

[8] Pequena Central Hidrelétrica

2.2 OBJETIVO GERAL

Este capítulo tem por objetivo geral analisar o comportamento do teor de umidade (%), densidade básica ($g.cm^{-3}$) e granulometria (mm) do cavaco residual de colheita florestal (Pinus e Eucalipto). Este estudo permitirá entender profundamente a dinâmica do mesmo dentro da empresa.

2.2.1 Objetivo específico

- Comparação entre umidade e a densidade do cavaco residual destinado a bioenergia, no campo e no pátio da empresa;

- Análise de granulometria e contaminantes de cavaco residual no campo e no pátio;

- Análise de casca no cavaco residual em campo e no pátio da empresa e sugerir metodologias de utilização de resíduo de casca acumulado em áreas de plantio.

2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

2.3.1 Biomassa Residual Direcionada a Energia

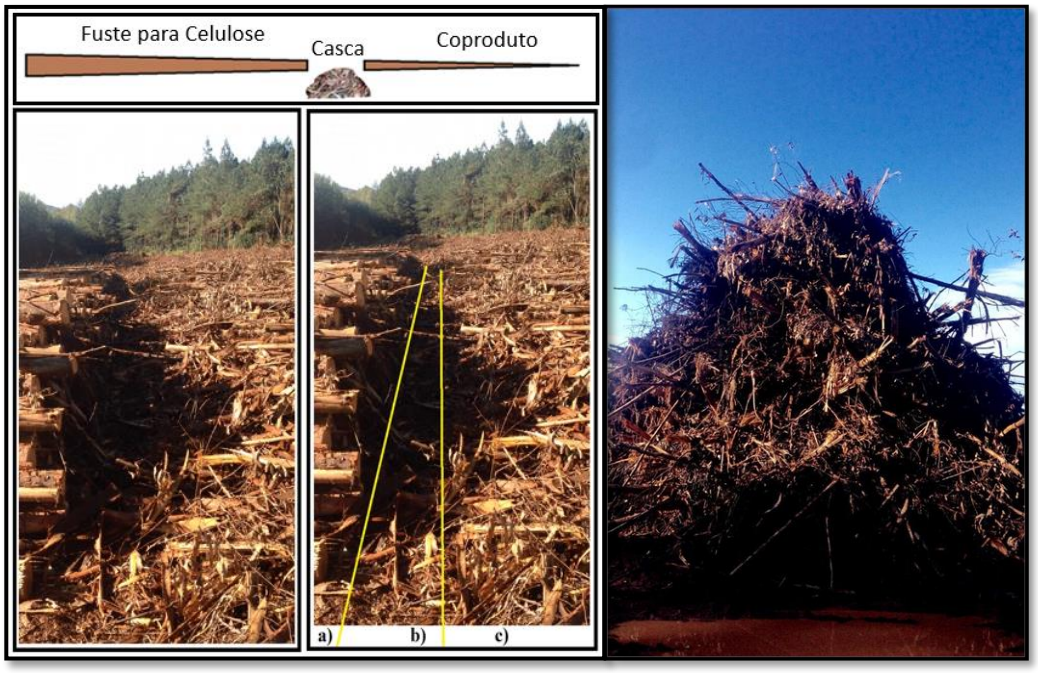
O processo de formação da biomassa residual em bosques tem início na colheita florestal, onde muitas empresas deixam de aproveitar esta matéria-prima. Normalmente, companhias de pequeno porte tendem a abandonar estes resíduos no campo ou elimina-los via combustão em áreas não apropriadas para esta finalidade. A viabilidade de utilização de resíduos florestais é diretamente proporcional ao tamanho da área florestal, montante gerado, facilidade de obtenção e custo baixo, estes pontos são crucias para viabilizar o seu aproveitamento.

Quando a biomassa residual de colheita é utilizada para bioenergia, normalmente são enleirados ou baldeados até a borda do talhão para picagem, algumas empresas, como no caso da Klabin, a árvore é arrastada por inteira até a beira do talhão onde é processada (sistema de colheita: *full tree*).

No momento que as árvores são colhidas pelo *feller buncher*, são arrastadas pelo *skidder*, em seguida a garra traçadora realiza a separação do fuste destinado a produção de celulose do coproduto. Neste processo o acúmulo de casca ocorre como mostra a Figura 2.1, onde estas são encontradas entre a madeira destinada a celulose e o coproduto, isto ocorre inerente a técnica utilizada no processamento da árvore.

Os resíduos de casca de Eucalipto produzidos no campo não possuem utilidade para a companhia, onde são depositados na forma de montes em áreas pré-determinadas dentro da empresa (Figura 2.1). O que realmente impede sua utilização é a alta resistência a tração e sua forma de tiras, ao ser transportado em direção a caldeira em um sistema de rosca sem fim, acaba por enroscar nas engrenagens, podendo causar acidentes graves com risco de incêndio e explosão. A casca de pequenas dimensões presente no cavaco para energia não oferece riscos e são incineradas na caldeira juntamente com o cavaco, porém possui um poder calorífico menor se comparado ao cavaco.

Figura 2.1. Processamento do *Eucalyptus urograndis* no campo. 1) a) fuste para celulose; b) casca; c) coproduto para energia. 2) Resíduos de casca de Eucalipto.



Fonte. Autor.

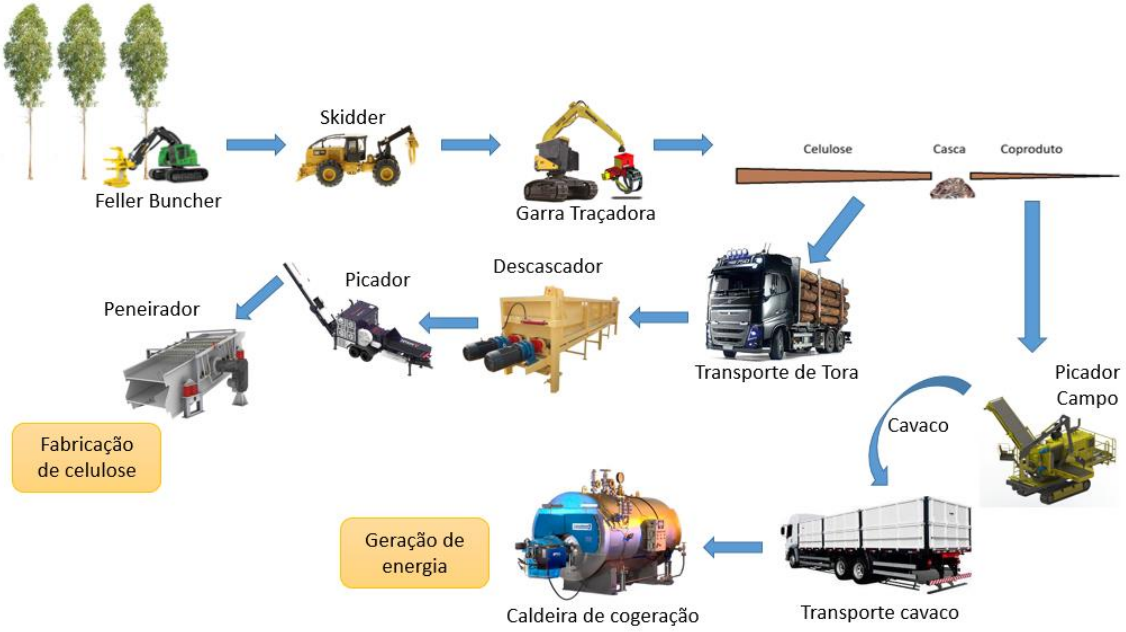
O fuste utilizado na produção de celulose é levado inteiro até a fábrica onde é processado, sendo efetuado o descascamento, picagem e peneiramento. A Figura 2.2 mostra os três processos principais: (A) as toras são levadas por uma rosca sem fim até o picador. Após picagem (B) do fuste este material é peneirado para retirada de impurezas e em seguida é direcionado para o processo de fabricação da celulose. Os resíduos provenientes do peneiramento do cavaco direcionado a produção de celulose são encaminhados para caldeira para cogeração de energia.

Figura 2.2. Processo de produção de cavaco para celulose. A) Descascamento das toras e produção de cavaco para celulose; B) Peneiramento do cavaco de celulose.

Fonte. Autor.

A sequência e maquinário utilizado no processamento de madeira para o fornecimento de matéria-prima para a produção de celulose e energia constam na Figura 2.3.

Figura 2.3. Fluxograma de produção da empresa até o produto final (Celulose e Energia).



Fonte. Autor.

Objetivando a perda de umidade e a queda das folhas e/ou acículas (interesse no material lenhoso), a empresa adota o método estocagem do coproduto na beira do talhão, com diferentes Tempos de Permanência no Campo (TPC). A Figura 2.4 ilustra o processo de produção do cavaco de resíduo florestal no momento da estocagem, até o procedimento de cavaqueamento. A grua (a) carrega o coproduto (b) até o picador CBI (c), em seguida a biomassa é transformada em cavaco e depositada em caminhões (d), onde é transportada até a indústria para a combustão em caldeira.

Figura 2.4. Processo de produção de cavacos utilizando resíduos de colheita. a) Grua florestal / b) Pilha de coproduto / c) Picador para cavaqueamento CBI / d) Transporte do cavaco para energia.

Fonte. Autor.

Quando a demanda de cavaco para energia aumenta, algumas áreas florestais da empresa podem ser destinadas totalmente para fins energéticos (áreas dedicadas). Este tipo de cavaco possuí uma qualidade melhor, pois a árvore é picada na totalidade, sendo denominado de Cavaco de Árvore Inteira. Depois do processamento no campo o cavaco para energia é depositado no estoque da fábrica, que fica localizada ao lado da planta de celulose. Na Figura 2.5 é possível verificar o tamanho do pátio de estoque.

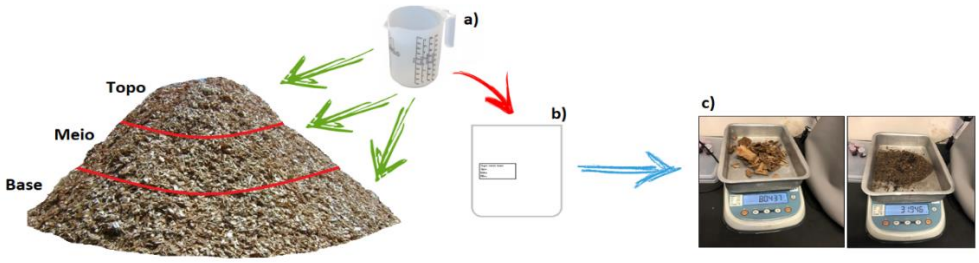
Figura 2.5. Pátio de estocagem de cavaco residual para energia. A esquerda os cavacos mais escuros são os comprados de terceiros e a direita os cavacos produzidos pela empresa Klabin.

Fonte. Autor.

2.3.2 Amostragem dos Diferentes Tipos de Cavaco

Ao todo foram coletadas 27 amostras de cavaco divididos em 9 tipos e 3 alturas diferentes por pilha (topo, meio e base), seguindo as normas da ABNT NBR 10007 (2004). Todas as amostras de cavaco coletadas são de coproduto (resíduo) de diferentes locais dentro da empresa (campo, próprio e terceiros), exceto o cavaco de árvore inteira. O material foi amostrado utilizando uma jarra de plástico de 1 L (média de 300g de cavaco coletado) e acomodadas em sacos plásticos devidamente identificados (Figura 2.6).

Figura 2.6. Processo de amostragem do cavaco – a) recipiente coletor / b) saco plástico devidamente identificado / c) pesagem. (ABNT, 2004).



Fonte. Autor.

O cavaco de árvore inteira de *Eucalyptus grandis*, cavaco de resíduo de *Pinus taeda* L. e o coproduto (Talhão BMIG8A - *Eucalyptus grandis*), foram coletados logo após o processamento a campo. As demais coletas no pátio da empresa (estoque), onde as amostras de cavaco são separados na área de estoque como cavaco próprio (produzido na empresa) e cavaco de terceiros (comprado de terceiros).

2.3.2.1 Teor de Umidade (%)

Com base na NBR 14929 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003a), o teor de umidade foi determinado em %. Foram analisados em torno de 300g de amostra, acomodadas em estufa com temperatura de 105ºC (±2ºC). No decorrer da secagem, medições de peso foram aferidas até que esse não variasse 0,5g entre duas pesagens sucessivas (Figura 2.7). Foram analisadas 24 amostras com 3 repetições (topo, meio e base), o coproduto do talhão BMIG8A não foi utilizado para a análise de teor de umidade, pois estava chovendo no dia da coleta.

Figura 2.7. a) Secagem das amostras de cavaco em b) estufa controlada a 105°C ± 2 e c) pesagem em uma balança com precisão de 0,001.

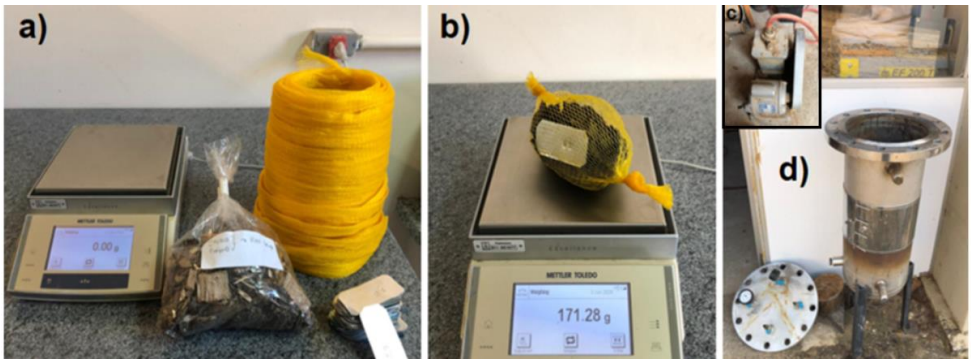
Fonte. Autor.

O cálculo utilizado para o teor de umidade seguiu as especificações, de acordo com a NBR 14929, Expressão 2 reportado no CAPITULO 1.

2.3.2.2 Densidade Básica

A densidade foi determinada de acordo com a NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003b), pelo método de máximo teor de umidade. Os cavacos coletados foram imersos em água em recipiente estanque (Figura 2.8 – d), com bomba a vácuo (Figura 2.8 – c), permanecendo durante cinco dias, até o ponto de saturação das fibras. Logo após, foram pesados úmidos e colocados para secar em estufa com controle de temperatura (105ºC ±2ºC), e pesados até atingir peso constante (não excedendo 0,5g em pesagens sucessivas). Foram medidas 27 amostras com 3 repetições (topo, meio e base da pilha).

Figura 2.8. Método utilizado para determinação da densidade básica do cavaco. a) materiais utilizados: balança de precisão (0,001g), saco em tela plástica; b) pesagem do cavaco; c) bomba de vácuo; d) recipiente estanque.



Fonte. Autor.

O cálculo utilizado para a densidade obedece aos requisitos da NBR 11941, Expressão 3 – CAPITULO 1.

2.3.2.3 Granulometria e impurezas dos cavacos

Com o intuito de analisar a granulometria e as impurezas (terra, casca e finos de madeira) presente nas amostras de cavaco, utilizou-se 6 peneiras granulométricas com diferentes tamanhos de malha, como mostra a Figura 2.9. Os tamanhos de malhas escolhidas foram adaptados devido ao tamanha dos cavacos (não superior a 51 mm) e a não existências de peneiras granulométricas nas numerações referidas pela LIPPEL nas dependências da USP/ESALQ. A fabricação destas peneiras tem custo elevado, entretanto, é um equipamento fundamental para empresas que compram biomassa florestal de terceiros. A sua principal importância é contribuir no controle da qualidade dos cavacos que entram na empresa, facilitando a classificação de acordo com suas dimensões e quantidade de contaminantes.

Figura 2.9. Peneira granulométrica para separação do cavaco em diferentes tamanhos. a) peneiras utilizadas ((51, 38, 25, 19, 9, 4 mm e finos (<4 mm)) / b) cavaco retido na peneira. / c) visão superior da peneira montada.

Fonte. Autor.

Utilizando uma balança de precisão de 0,001g, pesou-se separadamente o cavaco presente em cada peneira, com o intuito de verificar as diferenças de tamanho do mesmo e seu grau de pureza. Como base de referência, levou-se em conta a Tabela 2.1 de classificação de acordo com LIPPEL (2014).

Tabela 2.1. Granulometria de cavacos proposta pela LIPPEL utilizado como base granulométrica.

Tamanho dos Cavacos							
Fino 3 mm	Pequeno 8 mm	Médio 16 mm	Grandes 25 mm	Extra Grande 45mm	Acima de 63 mm	Comprimento <100 mm	Comprimento <200 mm

Especificação do tamanho e distribuição das partículas de cavaco de madeira			
Classe de tamanho	Fração Principal (>80% do peso)	Fração de finos (<5% do peso)	Fração grosseira Máximo tamanho de partículas
P16	3.15 mm < T < 16 mm	< 1 mm	Max. 1% > 45 mm, todos < 85 mm
P25	3.15 mm < T < 16 mm	< 1 mm	Max 1% > 45 mm
P45	3.15 mm < T < 45 mm	< 1 mm	Max 1% > 63 mm
P63	3.15 mm < T < 63 mm	< 1 mm	Max 1% > 100 mm
P100	3.15 mm < T < 100 mm	< 1 mm	Max 1% > 200 mm

Fonte. LIPPEL (2014).

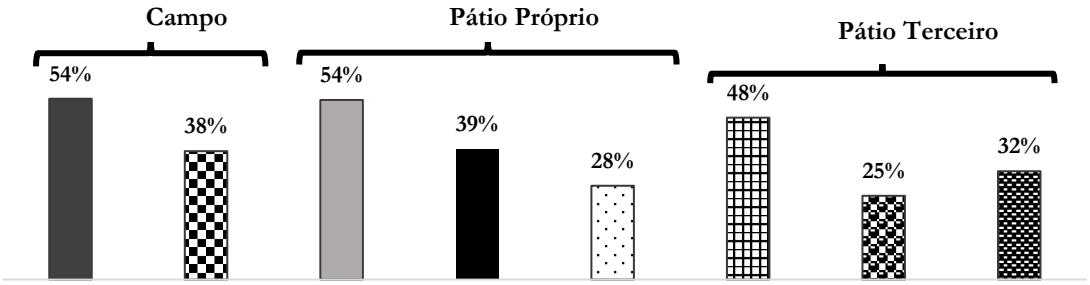
2.4 RESULTADOS

2.4.1 Teor de Umidade

Para o teor de umidade foram analisadas 24 amostras de cavaco residual para energia, sendo eles: Cavaco de Resíduo de Pinus (Res. Pinus), Cavaco de Árvore Inteira (Árv. Inteira), Cavaco Preparado Próprio (Cavaco Prep.) Cavaco de Resíduo Próprio (Cav. Próprio), Cavaco de Terceiro Novo, Cavaco Próprio Restingão e Cavaco Terceiro Velho.

Na Figura 2.10 é possível observar a variação do teor de umidade (%) de todos os cavacos, relacionando com o local de coleta (campo, pátio próprio e pátio terceiro). Os cavacos de resíduo de Pinus (Res. Pinus) e de árvore inteira (Árv. Inteira) foram coletados no campo e o restante foram coletados no pátio da empresa (estoque). Os cavacos do pátio foram divididos em Próprios (produzido na empresa) e de Terceiros (comprado externamente). Os três tipos de cavacos que apresentaram menor teor de umidade foram: Cavaco de Terceiro Novo (Cav. T. Novo = 25%), Cavaco Próprio Restingão (Restingão = 28%) e Cavaco Terceiro Velho (Cav. T. Velho = 32%), respectivamente. Os três tipos de cavacos com menores teores de umidade estão localizados no pátio e dois dos três tipos de cavacos com menores teores de umidade são comprados de produtores externos (terceiros).

Figura 2.10. Teor de umidade (%) do cavaco residual para uso energético, segundo NPR 14929.



Fonte. Autor.

Para os dados de umidade dos diferentes tipos de cavacos (%), realizou-se a análise de variância (ANOVA), com o objetivo de verificar se existe diferença entre as médias. Assim, o teste f demonstrou que o f calculado foi maior que o tabelado ($f_{calc.} > f_{tab.}$ / $p_{valor} = 0{,}001$), ou seja, há diferença estatística entre os cavacos quando comparado o teor de umidade (%). Com isso, foi aplicado o Teste de Tukey a 5%, para verificar se existe um padrão entre cavaco do campo, próprio e terceiro, sendo evidenciado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Resultado do teste de médias de Tukey com relação a umidade (%) do cavaco.

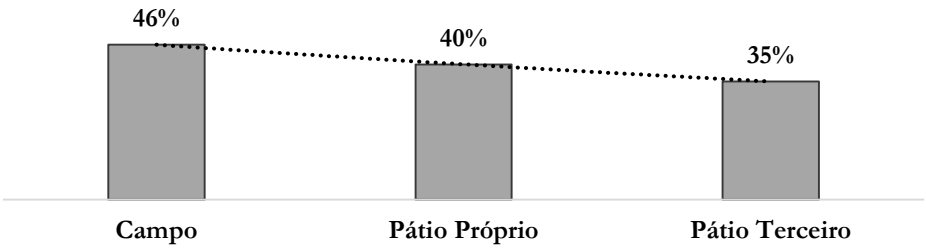
Textura	Local	Cavaco	Médias (%)	*Resultado
	Terc.	Cav. T. Novo	25	a1
	Próp.	Restingão	28	a1 a2
	Terc.	Cav. T. Velho	32	a1 a2 a3
	Camp.	Árv. Inteira	38	a1 a2 a3
	Próp.	Cav. Prep.	39	a1 a2 a3
	Terc.	Cav. Terceiro	48	a2 a3
	Próp.	Cav. Próprio	54	a3
	Camp.	Res. Pinus.	54	a3

*Letras numeradas na mesma linha não diferem entre si. **Fonte.** Autor.

Valores de teor de umidade de resíduos de galhos de *Eucalyptus grandis* em uma empresa do ramo de papel e celulose chegaram a 9,74%, provavelmente devido ao longo tempo de permanência no campo e do clima seco do extremo sul da Bahia (SILVA, 2013). Souza *et al.* (2012) estudando resíduo de colheita de *Pinus taeda* L. em Tunas do Paraná, PR, observou valores próximos a 63% de umidade deste material. Como a maioria desta biomassa residual é seca ao ar livre, o clima da região tem influência direta na secagem.

Com relação aos dados dispostos entre campo, próprio e terceiro, houve diferenciação entre eles, constatando que o cavaco comprado de terceiros possui o menor teor de umidade. Por outro lado, fica óbvio quando analisada a Figura 2.11 que o cavaco imediatamente processado no campo possui um teor de umidade mais elevado (6% relacionado ao cavaco próprio e 11% maior que o cavaco comprado de terceiros).

Figura 2.11. Teor de umidade de cavaco residual comparando coleta no campo e no pátio da fábrica (2 tipos: Próprio e de Terceiros), coleta de dados de acordo com as normas da ABNT.



Fonte. Autor.

Encontra-se na Tabela 2.3 os valores de teor de umidade (%) separados em amostras coletadas no topo, meio e base da pilha e localizadas no campo e no pátio. Há também referências ao cavaco estocado da própria empresa e do cavaco comprado de terceiros.

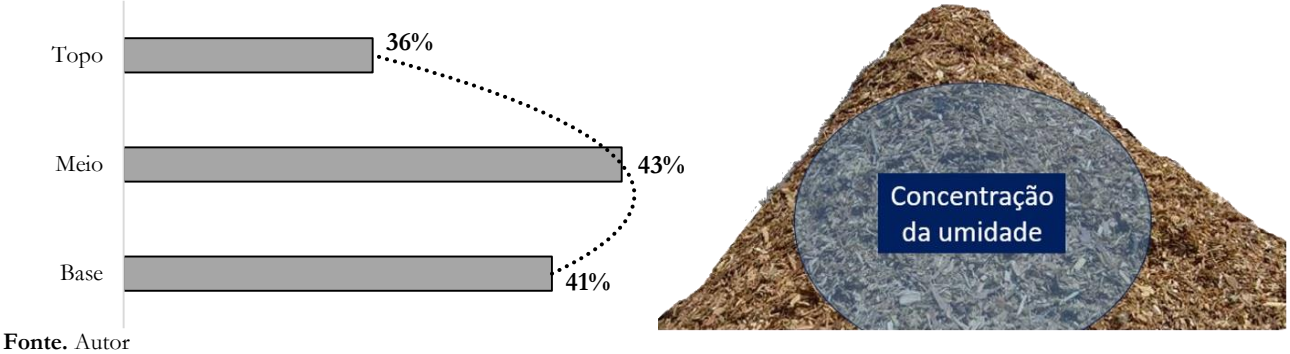
Tabela 2.3. Dados de teor de umidade em %, separados em cavaco do campo, cavaco do pátio (próprio e de terceiros) localizados no topo, meio e na base da pilha.

Amostra	Campo	Pátio Próprio	Pátio Terceiro
Topo	41%	39%	29%
Meio	46%	40%	43%
Base	50%	40%	34%

Fonte. Autor.

Através dos dados de umidade em três diferentes localizações na pilha de cavaco (topo, meio e base), verificou-se que não há diferença estatística entre eles, porém os maiores teores estão localizados no meio da pilha. Com isso, constatou-se que a esfera azul ilustrada ao lado do gráfico de barras (Figura 2.12) explica o padrão da umidade dentro da pilha de cavacos, com referência ao gráfico.

Figura 2.12. Teor de umidade da pilha de cavaco, referente as amostras coletadas no topo no meio e na base.



Fonte. Autor

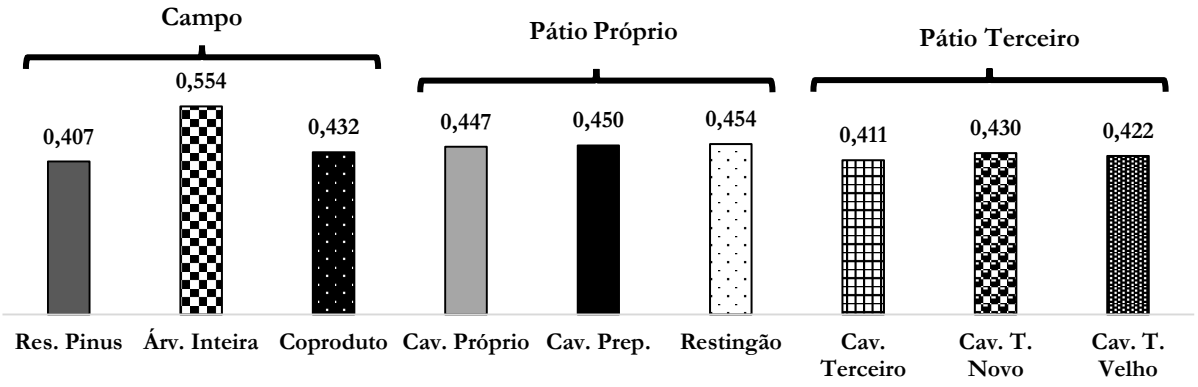
Estudos realizados por Busquim (2019) demonstraram que em um período de 31 dias os cavacos estocados no pátio sofreram grande variação de umidade em relação a umidade inicial, isso ocorreu devido a incidência de precipitação sobre o material, chegando a um acréscimo de 12% no teor de umidade. Quando as amostras foram acondicionadas em um lugar protegido de pluviosidade para manter a umidade da biomassa constante, observou uma redução de 5,5% no teor de umidade contida no cavaco. De acordo com Parigot (2014) o teor de umidade interfere diretamente no poder calorífico da biomassa, ou seja, quanto maior o teor de umidade menor é o poder calorífico (inversamente proporcional). Na região de Colombo/PR, Sturion e Tomaselli (1990) estudando secagem de lenha de *Mimosa scabrella* concluíram que tanto a secagem ao ar livre (42% menos umidade) como a em barracão (38% menos umidade) propiciaram boa secagem, sendo que ao final da secagem o poder calorífico aumentou em 130%.

2.4.2 Densidade Básica

Os dados de densidade básica do cavaco foram analisados de acordo com o local de coleta (campo e pátio), produção própria e de terceiros e posição na pilha, ou seja, disposição seguindo o mesmo padrão do teor de umidade. Para esta comparação foi adicionado o coproduto processado no campo, com TPC de 365 dias, sendo utilizado somente para esta análise devido pluviosidade do dia da coleta. É possível verificar na Figura 2.13 que as três maiores densidades foram: Cavaco de Árvore Inteira (Árv. Inteira = 0,554 g/cm³), Cavaco Próprio Restingão (Restingão = 0,454 g/cm³) e Cavaco Próprio Prep. (Cav. Prep. = 0,450 g/cm³), respectivamente. Com isso, é evidente a maior densidade dos cavacos quando produzidos pela empresa se comparado com o cavaco comprado de terceiros.

A madeira de Pinus possui naturalmente uma densidade menor do que a Eucalipto, por isso o menor resultado encontrado foi do Cavaco Residual de Pinus (0,407 g/cm³). Mesmo assim, é possível notar diferenças nas médias da densidade básica, onde o maior valor encontrado foi o cavaco de árvore inteira. Isso ocorre devido a qualidade da matéria prima utilizada que é proveniente da árvore inteira, não somente dos resíduos. O cavaco de terceiros foi o que obteve o menor valor de densidade, cerca de 26% menor que o cavaco de árvore inteira e por volta de 9% menor que o cavaco prep. que é produzido pela própria empresa e estocado no pátio.

Figura 2.13. Densidade básica em g/cm³ do cavaco determinada conforme as normas da NBR 11941.



Fonte. Autor.

Soares (2016) analisando cavaco de *Eucalyptus* sp. no estado do Paraná, com casca e sem casca, observou resultados de 0,579 e 0,531 g/cm³, respectivamente, valores próximos ao cavaco de árvore inteira do presente estudo. Couto *et al.* (1984) estudando a densidade básica de madeira de *Eucalyptus saligna* na cidade de Rio Claro – SP encontraram valores próximos a 0,5 g/cm³.

Para os dados de densidade básica dos diferentes tipos de cavacos (g/cm³), foi realizada a análise de variância (ANOVA) com o objetivo de verificar a existência de diferença estatística entre as médias. Assim, o teste f demonstrou que o f calculado foi maior que o tabelado ($f_{calc.} > f_{tab.}$ / $p_{valor} = 0{,}001$), ou seja, há diferença estatística entre os cavacos quando comparado a densidade básica (g/cm³). Com isso, foi aplicado o Teste de Tukey a 5% para verificar se existe um padrão entre cavaco do campo, próprio e terceiro. Apesar da existência de um padrão, o teste de médias considerou diferente somente o Cavaco de Árvore Inteira (Árv. Inteira) Tabela 2.4. Desta forma, constatou-se que os cavacos mais densos são encontrados no Campo e no Pátio Próprio, provavelmente pelo fato de serem mais novos e por percorrerem uma distância menor na operação de deslocamento do material.

Tabela 2.4. Resultado do Teste de médias de Tukey com relação a densidade básica (g/cm³) do cavaco.

Textura	Local	Cavaco	Médias (g/cm³)	Resultado
	Camp.	Res. Pinus.	0,407	a1
	Terc.	Cav. Terceiro	0,411	a1
	Terc.	Cav. T. Velho	0,422	a1
	Terc.	Cav. T. Novo	0,430	a1
	Camp.	Coproduto	0,432	a1
	Próp.	Cav. Próprio	0,447	a1
	Próp.	Cav. Prep.	0,450	a1
	Próp.	Restingão	0,454	a1
	Camp.	Árv. Inteira	0,554	a2

*Letras numeradas na mesma linha não diferem entre si. **Fonte.** Autor.

Na Tabela 2.5 é possível verificar os dados de densidade básica em g/cm³, relacionados ao posicionamento da amostra na pilha (Topo, Meio e Base) e de acordo com os três locais de coleta: Campo, Pátio Próprio e Pátio Terceiro.

Tabela 2.5. Densidade básica do cavaco (g/cm³) em três diferentes posições na pilha (topo, meio e base) e referente a localização das pilhas na empresa (campo, pátio próprio e pátio terceiro).

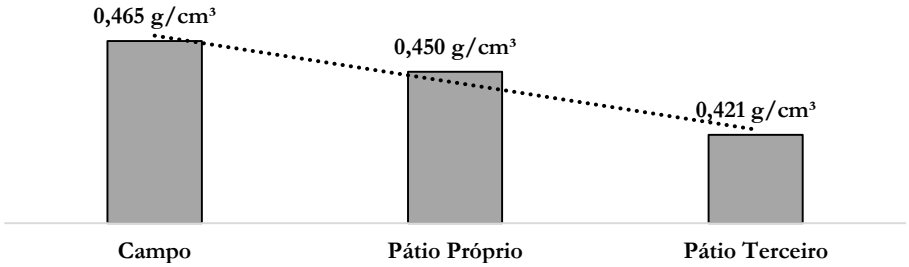
	Campo	Pátio Próprio	Pátio Terceiro
Topo	0,474	0,447	0,430
Meio	0,462	0,445	0,404
Base	0,458	0,459	0,429

Fonte. Autor.

Estatisticamente não houve diferença entre as médias da densidade básica com relação ao local de coleta (Campo, Pátio Próprio e Pátio Terceiro). Mas se comparado o cavaco no campo com a densidade do cavaco de terceiros, há uma diferença de 9,5% (Figura 2.14). Assim, 23 toneladas de cavaco do campo correspondem a 49,5 m³ e 23 toneladas de cavaco de terceiro corresponde a 54,6 m³, diferença de 5,1 m³ no volume. Para uma comparação de peso, considerando 49,5 m³ para o cavaco do campo e o pátio terceiro, existe uma diferença de 1 tonelada a mais no cavaco do campo. E se comparado o cavaco próprio com o cavaco de terceiro estocado no mesmo local, a diferença da densidade é de 6,4%. Concluiu-se também que do campo ao estoque no pátio da fábrica há uma redução de 3,2% na densidade do cavaco de biomassa residual.

Ao analisar os dados de densidade básica, concluiu-se a necessidade que é necessária uma área de estoque maior para armazenar o cavaco de terceiro do que para armazenar a mesma quantidade de cavaco residual da própria empresa, devido a sua baixa densidade.

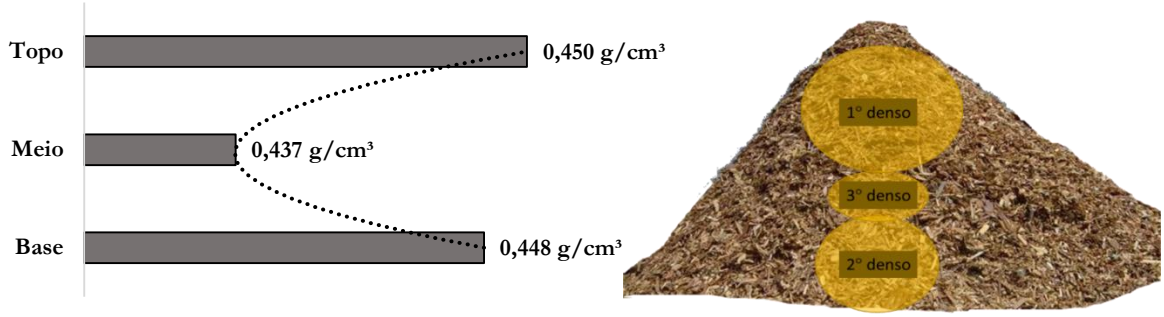
Figura 2.14. Comparação da densidade básica relacionada aos 3 diferentes locais de coleta do cavaco.



Fonte. Autor

Apesar dos cavacos apresentarem diferença estatística com relação a localização da amostra na pilha (Topo, Meio e Base), não foi encontrado um padrão entre eles, pois o esperado era que o cavaco mais denso fosse encontrado na parte basal da pilha (Figura 2.15).

Figura 2.15. Densidade do cavaco com relação a sua posição na pilha.



Fonte. Autor.

2.4.3 Granulometria do cavaco para bioenergia

Na Tabela 2.6 constam os dados relacionados a granulometria dos cavacos direcionados a bioenergia, submetidos a peneiramento (51, 38, 25, 19, 9, 4 mm e finos (<4 mm)) para análises de dimensões. Os dados foram apresentados em porcentagem devido a diferença nos pesos das amostras, facilitando a sua compreensão. Percebe-se que o montante de cavaco com granulometria acima de 38 mm é prioritariamente encontrado no Resíduo de Pinus (Res. Pinus), Árvore Inteira, coproduto, Cav. T. Velho (Cavaco comprado de terceiros mais antigo) e Cav. Terceiro (Cavaco comprado de terceiro mais novo), não aparecendo nos demais. Constatou-se que majoritariamente os cavacos residuais de maiores dimensões estão presentes no Campo (Res. Pinus, Árv. Inteira, Coproduto).

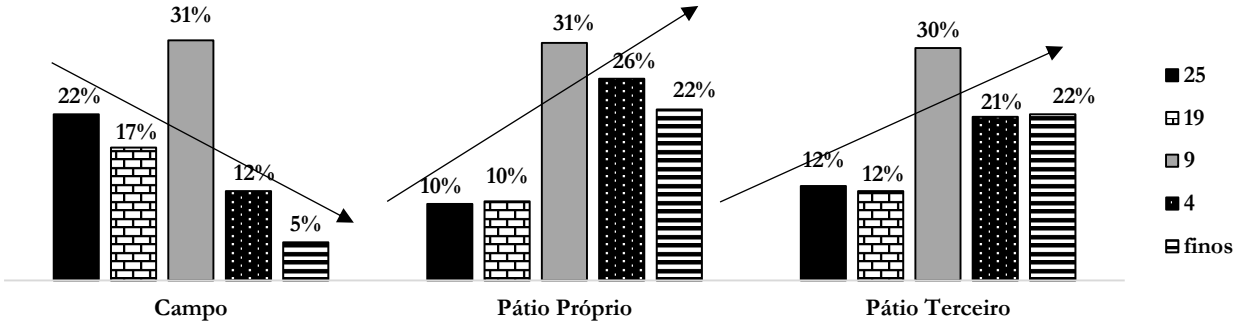
Tabela 2.6. Porcentagem de cavaco para cogeração, submetido a peneiramento granulométrico, nas malhas 51, 38, 25, 19, 9, 4 e finos.

(mm)	51	38	25	19	9	4	Finos
Res. Pinus	5%	19%	29%	19%	18%	7%	3%
Árv. Inteira	1%	9%	24%	18%	34%	11%	3%
Coproduto	2%	3%	12%	15%	42%	17%	9%
Cav. Próprio	-	-	20%	16%	33%	17%	14%
Cav. Prep.	-	-	1%	3%	24%	39%	33%
Restingão	-	-	9%	12%	36%	23%	20%
Cav. T. Novo	-	-	4%	10%	36%	27%	23%
Cav. T. Velho	1,5%	0,5%	17%	14%	25%	19%	23%
Cav. Terceiro	-	6%	16%	11%	30%	18%	19%

Fonte. Autor.

Como somente a partir da malha 25 mm todos os cavacos apresentaram dados para comparação, considerou-se este tamanho (25mm) como a maior granulometria e finos (<4mm) com a menor. Observa-se que do montante coletado a campo, 5% foram de resíduos indesejados (finos de madeira, terra e casca) e o estocado apresenta 22%, ou seja, diferença de 17%. O cavaco tende a apresentar menores dimensões no pátio, como pode ser verificado na Figura 2.16. Isto ocorre provavelmente, devido ao transporte e a utilização de maquinário pesado para movimentação da biomassa no pátio, fazendo com que suas dimensões diminuam e consequentemente influenciando na maior quantidade de finos indesejados no cavaco. Schürhaus (2007) afirmou que sólidos em suspensão são extremamente prejudiciais a combustão em caldeira.

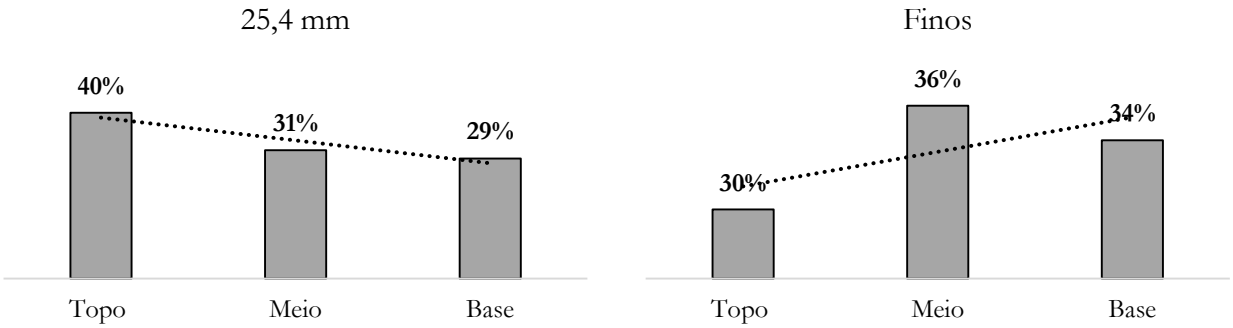
Figura 2.16. Comparação da granulometria do cavaco no Campo, Pátio Próprio e Pátio Terceiro para 5 diferentes tamanhos de peneira: 25, 19, 9, 4, finos (mm).



Fonte. Autor.

Dados de granulometria relacionados a posição na pilha (topo, meio e base) podem ser vistos na Figura 2.17, onde os cavacos para cogeração apresentaram maiores dimensões no topo e os finos são encontrados em sua maioria no meio e na base. Conforme o cavaco é depositado e movimentado no pátio de estoque, partículas finas tendem a se movimentar sentido base, fazendo com que o cavaco de maiores dimensões permaneça no topo da pilha.

Figura 2.17. Comparação da granulometria do cavaco para bioenergia entre a maior peinara (25,4 mm) e menor peneira (finos < 4 mm).



Fonte. Autor.

Com o intuito de classificar os cavacos coletados, utilizou-se como base a tabela da LIPPEL (2014) (Tabela 2.1). Os cavacos do campo apresentaram maiores dimensões, sendo que o de Pinus obteve a maior granulometria, isso ocorre em razão do processamento com um picador diferente dos demais que estava em teste, mas acabou não sendo adquirido pela empresa devido as grandes dimensões do cavaco. De fato, uma granulometria elevada ou com grande presença de finos (cavaco de terceiro) causa uma combustão irregular do cavaco, ocorrendo perdas no processo.

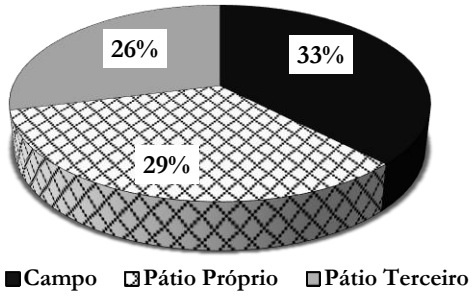
Tabela 2.7. Classificação do cavaco residual de acordo com classificação da LIPPEL.

Cavaco Cogeração	Classificação LIPPEL
Res. Pinus	P63
Árv. Inteira	P45
Coproduto	P45
Cav. Próprio	P45
Cav. Prep.	P25
Restingão	P25
Cav. T. Novo	P16
Cav. T. Velho	P25
Cav. Terceiro	P25

Fonte. Autor.

De acordo com os dados da Figura 2.18, percebe-se uma diminuição na quantidade de terra presente no cavaco relacionado ao campo, pátio próprio e pátio terceiro, provavelmente isso acontece em decorrência do transporte. Com a trepidação do caminhão até o pátio da fábrica ou no caso do cavaco de terceiros que percorrem distâncias consideráveis, a quantidade de terra presente provavelmente se perde no caminho.

Figura 2.18. Porcentagem de terra presente nos finos (<4 mm) direcionado a bioenergia.



Fonte. Autor.

2.4.4 Análise da casca de *Eucalyptus grandis*

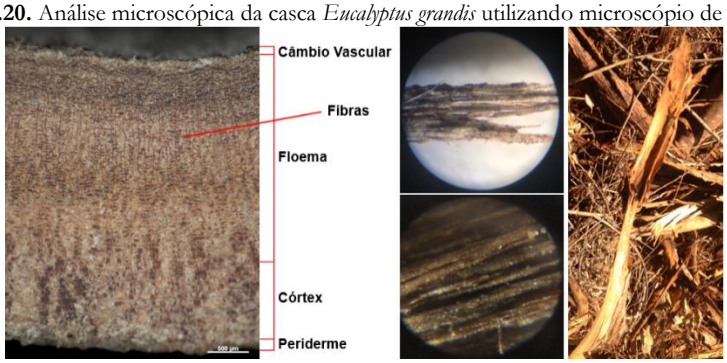
A casca do Eucalipto é um resíduo produzido em sua grande maioria no campo durante o processo de colheita, eventualmente uma porcentagem acaba indo junto com o cavaco. Foram feitas análises da microscopia da casca e sua presença nos finos do cavaco direcionada a energia, para a microscopia utilizou-se o Microscópico Zeiss com Axio Cam. Acoplada (Figura 2.19).

Figura 2.19. Análise de microscopia da casca de *Eucalyptus grandis* nas dependências do laboratório de anatomia e dendrocronologia USP – ESALQ.

Fonte. Autor.

A casca do Eucalipto possui a peculiaridade de desprender do tronco, isso acontece devido as células mortas do ritidoma que após o ocorrido caem ao solo ou normalmente ficam penduradas na árvore. Devido ao método de colheita da empresa Klabin, a maioria dos resíduos de casca ficam no campo, ocasionando acúmulo e muitas vezes, ocupam áreas passíveis de cultivo.

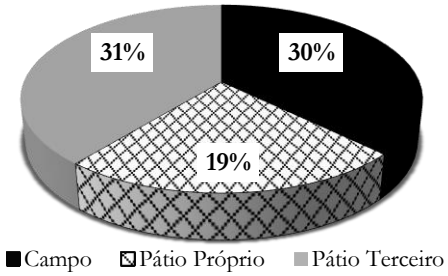
Figura 2.20. Análise microscópica da casca *Eucalyptus grandis* utilizando microscópio de precisão.



Fonte. Autor

Com relação a presença de cascas nos finos dos cavacos, observou-se uma quantidade maior nos comprados de terceiros, provando ainda mais que se deve realizar análises preliminares mais adequadas dos cavacos comprados, pois possuem características inferiores aos cavacos produzidos na própria empresa (Figura 2.21).

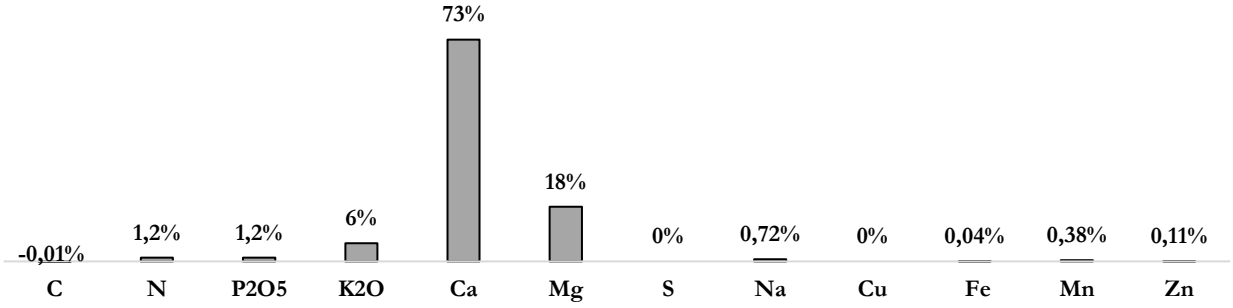
Figura 2.21. Porcentagem de casca presente nos finos (<4 mm) direcionada a bioenergia.



Fonte. Autor.

Analisando a Figura 2.22, adaptado de Andrade *et al.* (2011), todos os mineiras citados apresentam maior concentração na casca do Eucalipto que na madeira, exceto o carbono. O cálcio e magnésio são os minerais em maior abundancia na casca quando comparado a madeira, atualmente a empresa gasta com suplementação mineral a base de cálcio e magnésio e as cascas continuam a se acumular no campo.

Figura 2.22. Comparação do teor de nutrientes entre casca e madeira*.



Fonte. Adaptado (DE ANDRADE et al., 2011). *Valores positivos (%) representam maiores teores de nutrientes na casca e negativos são referentes a madeira.

Devido ao acúmulo de casca no campo, sem utilidade e os grandes gastos com adubação a base de cálcio e magnésio, a solução mais adequada seria a picagem deste material (Figura 2.20) e a incorporação do mesmo no solo utilizando implemento agrícola de subsolagem.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS – CAPÍTULO 2

Os cavacos do campo, do pátio próprio e do pátio de terceiros, apresentaram diferença estatista significativa entre eles, sendo que no cavaco do campo foi observado um teor de umidade 6% maior que o cavaco próprio, sendo 11% maior que o cavaco comprado de terceiros. Com relação a posição do cavaco na pilha, o topo apresentou o menor teor de umidade, cerca de 7% menor que o meio e 5% menor que na base da pilha.

Houve diferença estatística significativa entre as densidades do cavaco do campo, do pátio próprio e do pátio de terceiros. As maiores densidades foram notadas no campo, onde comparando-a com a densidade do cavaco de terceiros, há uma diferença de 9,5%. Os cavacos de maiores densidades concentraram-se, em sua maioria, no topo da pilha onde foram 2,8% maiores que no meio e 0,5% maior que na base da pilha.

A granulometria do cavaco foi maior no campo que no pátio da empresa (próprio e terceiro) e os resíduos indesejados no cavaco do campo (finos de madeira, terra e casca) foram 17% menores que o cavaco estocado, ou seja, há uma quantidade de finos de madeira, terra e casca maior no pátio que no campo. Os cavacos com menores dimensões (finos: <4mm) estão localizados em sua maioria no meio e na base da pilha, sendo 6% e 4% maior que no topo, respectivamente. Os cavacos de maiores dimensões (25mm) estão presentes no topo da pilha, sendo que a base da pilha possui 11% a menos desse tipo de cavaco. O cavaco do campo apresentou maiores quantidades de terra que os demais e o cavaco de terceiros a maior quantidade de casca.

As cascas de Eucalipto que atualmente se acumulam no campo ao chegarem na fábrica podem causar danos aos equipamentos em decorrência da sua alta resistência a tensão. Sugere-se que estes resíduos de casca sejam picados com equipamento específico para que o produto seja utilizado na implementação de florestas, objetivando a incorporação deste material ao solo para resultar em um aumento da disponibilidade de Cálcio e Magnésio.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 14929 - Madeira: determinação da umidade da madeira.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2003a. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/>.

ABNT. **NBR 11941 - Madeira: determinação da densidade básica.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003b. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/>.

ABNT. **NBR 10007**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. Disponível em: <http://www.abnt.org.br>.

BRAND, M. A. et al. Produção de Biomassa para Geração de Energia em Povoamentos de Pinus taeda L. com Diferentes Idades. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 353–360, 2014.

BUSQUIM, J. L. **Estudo Da Variabilidade No Teor De Umidade Do Cavaco De Eucalyptus Spp Utilizado Como Fonte Energética Em Diferentes Condições De Armazenagem**. Maringá, Brasil: Centro Universitário de Maringá (UNICESUMAR), 2019.

COUTO, H. T. Z. et al. Quantificação de resíduos florestais para produção de energia em povoamento de Eucalyptus saligns. **Ipef**, v. 26, p. 19–23, 1984.

DE ANDRADE, M. C. N. et al. Estudo Comparativo Da Constituição Nutricional Da Madeira E Casca De Espécies E Clones De Eucalipto Visando O Cultivo De Shiitake Em Toras. **Revista Arvore**, v. 35, n. 2, p. 183–192, 2011.

EPE. **Potencial Energético de Resíduos Florestais do Manejo Sustentável e de Resíduos da Industrialização da Madeira.**BrasilEmpresa de Pesquisa Energética, , 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-312/NT-EPE_17-2018_Biomassa-Lenhosa-Residual_2018-10-17.pdf>

ESPER, A. E. **Aproveitamento de Biomassa de Madeira Como Fonte de Geração Renovável de Energia: Estudo de Caso.** [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, 2016.

IBÁ. **Relatório Anual 2020 - Indústria Brasileira de Árvores**: 1. Brasilia-DF: Indústria Brasileira de Árvores, 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>.

LAURI, P. et al. Woody biomass energy potential in 2050. **Energy Policy**, v. 66, n. March, p. 19–31, 2014.

LIPPEL. **Qualidade dos Cavacos**: 1. Agrolândia, SC: LIPPEL - Equipamentos de Alta Performace, 2014. Disponível em: <https://www.lippel.com.br/Assets/Downloads/05-05-2014-10-36qualidade-dos-cavacos-para-combustao.pdf>.

PARIGOT, P. **Relação entre a Umidade e o Poder Calorífico da Biomassa Utilizada na COCELPA**. Curitiba, PR, Brasil: Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2014.

SCHÜRHAUS, P. **Produtos e Propriedades Energéticas da Madeira**. União da Vitória, PR, Brasil: Centro Universitário de União da Vitória - UNIUV, 2007. Disponível em: <www.hasten.eng.br>.

SILVA, A. G. **Condicionamento de resíduo de Eucalyptus grandis para produção de biocombustível sólido Condicionamento de resíduo de Eucalyptus grandis para produção de biocombustível sólido**. Salvador, BA, Brazil: Universidade Federal da Bahia, 2013.

SOARES, J. M. **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE TRÊS DIFERENTES TIPOS DE CAVACOS DE MADEIRA DO HÍBRIDO Eucalyptus urophila x grandis**. Curitiba, PR, Brasil: Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2016.

SOUZA, M. M. DE et al. Estimativa de Poder Calorífico e Caracterização para uso Energético de Resíduos da Colheita e do Processamento de Pinus taeda. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325–334, 2012.

STURION, J. A.; TOMASELLI, I. A influência do tempo de estocagem de lenha de bracatinga na produção de energia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 21, p. 37–47, 1990.

3. AJUSTE DE MODELOS VOLUMÉTRICOS PARA COPRODUTO DE *Eucalyptus grandis* DESTINADO A ENERGIA

RESUMO

As florestas naturais restantes no mundo devem ser prioritariamente preservadas, objetivando mitigar os efeitos do aquecimento global e contribuir para conservação da biodiversidade. Um modelo matemático representa uma situação da realidade ou um problema a ser resolvido, ele ilustra simplificadamente certos aspectos da problemática analisada. Existe a possibilidade de mais de um modelo matemático representar a mesma situação, visto que cada pesquisador tem a liberdade de utilizar a metodologia que julgar apropriada. Foram ajustados 4 modelos para estimar a produtividade em m³, utilizando dados de diâmetros e alturas de 66 coprodutos. Os modelos escolhidos foram: linear simples (1), linear quadrático (2), não linear exponencial (3) e não linear potência (4). Especificamente, dos quatro modelos o que melhor se ajustou aos dados foi o não linear em potência (modelo número 4), onde os parâmetros estatísticos apresentaram valores significativos (AIC: -501,4267 / $R^2_{ajust.}$: 0,8730 / Syx %: 0,0621 / P-valor: <0,01), enfatizado pela distribuição de resíduos. O volume real total dos 66 coprodutos foi de 1,485 m³ e o modelo escolhido estimou um valor de 1,522 m³, diferença de 2,4%. O modelo 4 pode ser aplicado para qualquer Tempo de Permanência no Campo (TPC), pois não apresentou diferença estatista entre os diâmetros da base e entre os volumes dos coprodutos, nas TPC's 90, 150 e 320 dias.

Palavras-chave: Modelos Matemáticos; Produção; Coproduto; Cubagem.

ABSTRACT

The remaining natural forests in the world must be preserved as a priority, with the aim of mitigating the effects of global warming and contributing to the conservation of biodiversity. A mathematical model represents a reality situation or a problem to be solved, it simply illustrates certain aspects of the analyzed problem. There is the possibility of more than one mathematical model representing the same situation, since each researcher is free to use the methodology he deems appropriate. Four models were adjusted to estimate productivity in m³, using data on diameters and heights of 66 co-products. The models chosen were: simple linear (1), quadratic linear (2), exponential nonlinear (3) and potency nonlinear (4). Specifically, of the four models, the one that best ajusted the data was the potency nonlinear (model number 4), where the statistical parameters presented significant values (AIC: -501.4267 / R^2adjust.: 0.8730 / Syx %: 0.0621 / P-value: <0.01), emphasized by the distribution of residues. The total real volume of the 66 co-products was 1,485 m³ and the chosen model estimated a value of 1,522 m³, a difference of 2.4%. Model 4 can be applied to any Time of Permanence in the Field (TPF), as it did not present a statist difference between the base diameters and between the volumes of the co-products, in the TPF's 90, 150 and 320 days.

Keywords: Mathematical Models; Production; Co-product; Cubing.

3.1 INTRODUÇÃO

Com a alta pressão antrópica sobre as florestas nativas ao longo do globo, chega-se a uma linha tênue entre exploração desenfreada e sustentabilidade. Dados do Sistema de Alerta de Desmatamento - SAD (2021) no mês de março, apontaram 1.125 km² de desmatamento na Amazônia Legal, 70% maior que no mesmo período do ano passado. Os três estados com maiores áreas desmatadas foram Pará (37%), Amazonas (23%) e Mato Grosso (20%). Com relação às florestas que foram degradadas, somam-se 39 km² só no mês de março, um aumento de 144% se comparado ao mesmo período do ano passado, destacando-se os estados do Mato Grosso (85%) e Pará (15%).

É importante salientar que as florestas naturais restantes devem ser prioritariamente preservadas, objetivando mitigar os efeitos do aquecimento global e contribuir para conservação da biodiversidade. De acordo com Fonseca et al., (2021) no período de 1985 – 2019 em áreas de Amazônia legal, por volta de 720.000 km² de florestas nativas, foram transformados em atividades agropecuárias. Por outro lado, os reflorestamentos de espécies de crescimento rápido vêm se difundindo no país, não somente na produção de celulose, mas também no fornecimento de matéria-prima para fabricação de esquadrias em geral, energia, papel, embalagens, entre outras. As novas tecnologias

aplicadas ao setor florestal brasileiro, bem como o melhoramento de espécies florestais dedicadas ao mercado, fazem com que a pressão exercida diminua sobre as florestas naturais.

Os reflorestamentos brasileiros possuem um desempenho produtivo elevado em comparação com outros países. As condições edafoclimáticas, os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e qualificação da mão-de-obra, proporcionaram ganhos em relação a produção florestal. De acordo com Encinas; Silva e Pinto (2005) o crescimento florestal é diretamente proporcional a disponibilidade de água, luz e nutrientes, sendo que as idades somadas aos fatores citados anteriormente, determinam a produtividade do povoamento. A interceptação de água, luz e nutrientes pelas árvores é controlada pelo espaçamento inicial de plantio, onde é definido na instalação do reflorestamento, podendo ser alterado ao longo do ciclo de vida através dos desbastes. Pacheco (2013) estudando *Pinus taeda* L. em Irati/PR, identificou-se que o espaçamento inicial de plantio influencia o crescimento em diâmetro das árvores, mas não obteve diferenças estatísticas no crescimento em altura, apesar de comprovado 11% de disparidade entre espaços vitais extremos (1 m^2 – 14 m^2).

Um dos parâmetros mais importantes na comparação do crescimento florestal é o Incremento Médio Anual (IMA), que como o próprio nome diz, consiste na média do crescimento no espaço de um ano, relacionado ao ciclo de vida de cada espécie. Ao compararmos o incremento médio anual (IMA) de outros países, o *Eucalyptus* sp. no Brasil produziu em média 46% a mais (40,7 $m^3.ha^{-1}.ano$) que na Austrália (22 $m^3.ha^{-1}.ano$), país de origem da espécie. O crescimento do gênero *Pinus* sp. no Brasil é, em média, 66% maior (40,1 $m^3.ha^{-1}.ano$) que no sul dos E.U.A. (13,7 $m^3.ha^{-1}.ano$), país de origem do gênero Pinus (ABRAF, 2013). Uma visão mais conservadora, pela diferença de metodologia utilizada, é apresentada pela Indústria Brasileiro de Árvores – IBÁ (2019), onde mesmo com a divergência nos incrementos (ABRAF: *Eucalipto* – 40,7 $m^3.ha^{-1}.ano$ e Pinus – 40,1 $m^3.ha^{-1}.ano$ / IBÁ: Eucalipto – 35,3 $m^3.ha^{-1}.ano$ e Pinus – 31,1 $m^3.ha^{-1}.ano$) o Brasil ainda segue na primeira posição entre todos os países do mundo, quando se trata da produtividade de plantios florestais.

Para uma produção constante e escalonada, faz-se necessário o planejamento baseado em dados coletados, processados e analisados. O controle da produtividade traz segurança a empresa e aos investidores, proporcionando disponibilidade de matéria-prima constante ao longo do tempo. De acordo com Rodrigues et al. (2014) a pesquisa operacional (PO) e seus métodos, como a programação linear, ajudam a definir o escalonamento da produção em decorrência da função objetivo (solução de um dado problema expressa matematicamente). Porém, faz-se necessário definir as variáveis de decisão para que o escalonamento seja adequado, no caso de florestas plantadas são necessários os dados de produção (estático) e crescimento (ao longo do tempo) florestal para cada sítio, juntamente com ajuste de modelos matemáticos para cada situação.

Um modelo matemático representa uma situação da realidade ou um problema a ser resolvido, pois ilustra simplificadamente certos aspectos da problemática analisada, ou seja, não se atem a todos os detalhes. Existe a possibilidade de mais de um modelo matemático representar a mesma situação, visto que cada pesquisador tem a liberdade de utilizar a metodologia que julgar apropriada (EMILIANO et al., 2010).

Comumente são empregados modelos matemáticos para estimativa do volume (m^3), onde utiliza-se esta como variável dependente. Normalmente são empregados o diâmetro na altura do peito (DAP) e a altura (H) como variáveis independentes, sendo que uma terceira variável pode ser utilizada dependendo do método calculado. Esta terceira variável é denominada de quociente de forma ou fator de forma da árvore, que consiste em um valor referente a conicidade da árvore ou da seção da mesma. No caso de ajuste de modelos florestais normalmente são utilizados os de simples entrada (DAP) e o de dupla entrada (DAP e H) (MACHADO; CONCEIÇÃO; FIGUEIREDO, 2002). Existem muito modelos volumétricos consolidados para estimar a produção florestal, podendo ser citados:

Schumacher-Hall (1933), Spurr (1952), Stoate, Naslund, Meyer entre outros. Optou-se nesta pesquisa por utilizar modelos básicos (linear e não-linear) e de simples entrada, pelo fato da altura do coproduto ser de difícil mensuração, pois este se encontra empilhado na borda do talhão.

O presente capítulo propõe o ajuste de modelos matemáticos para predição de volume de coproduto disponível, utilizando o mesmo como variável dependente e o diâmetro da base como variável independente, este processo matemático auxilia nas estratégias de utilização da biomassa para a cogeração de energia.

3.2 OBJETIVO GERAL

O capítulo 3 tem como objetivo geral o ajuste de modelos volumétricos para coproduto, onde sua principal função é a predição da produção de cavaco residual para geração de energia. Isso permitirá que a companhia crie estratégias mais precisas na logística do cavaco residual (coproduto), permitindo realizar a predição da produção de cavacos de forma adequada.

3.2.1 Objetivo específico

- Ajuste de modelos volumétricos para coproduto e escolha do melhor modelo em relação aos dados;

- Comparação entre o volume real e o volume estimado;

- Comparação do coproduto em três diferentes tempos de permanência no campo (TPC's: 90, 150 e 320 dias) em relação ao diâmetro da base.

3.3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.3.1 *Área do Estudo*

Os estudos deste capítulo foram realizados nas áreas da Klabin em Telêmaco Borba – PR, com coordenadas geográficas 24° 19' 26" Sul 50° 36' 57" Oeste. O clima da região foi caracterizado como Cfa/Cfb segundo classificação de Köppen e Geiger. As coletas de dados foram realizadas nos seguintes talhões: BMIG8A, Cerradinho (WOA, W2A, K7A, C9A, C9C, D1C, T6A, T9A, T4A) e ACOA3D.

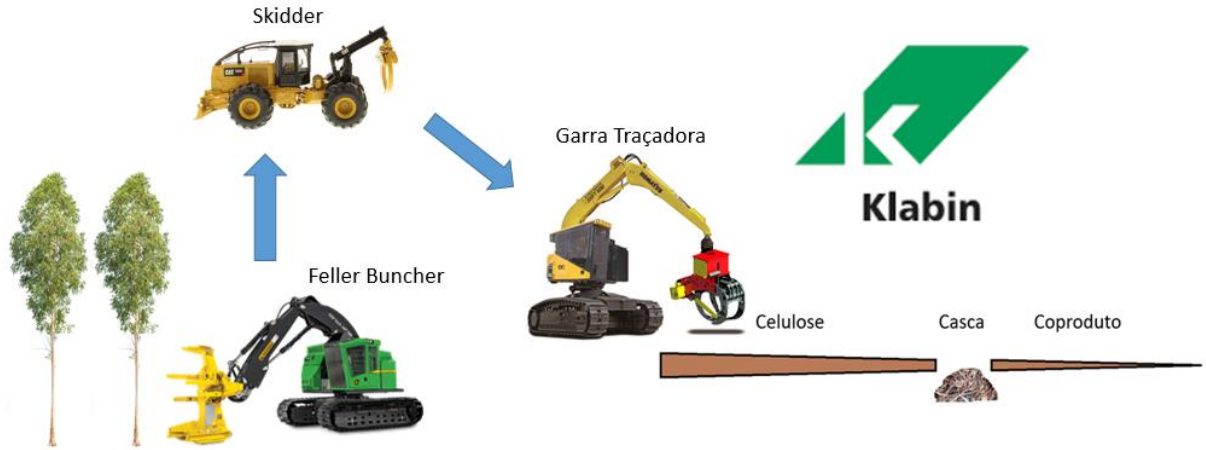
3.3.2 Silvicultura e Sistema de Colheita – COPRODUTO

O *Pinus taeda* L. e o *Eucalyptus grandis* são as duas espécies mais utilizadas pela empresa, com porcentagem de área plantada de 40 e 60%, respectivamente. As densidades de plantio utilizadas são: 3m x 2,5m (1.333 árv.ha^{-1}), 3m x 2m (1.667 árv.ha^{-1}) e para plantios mais antigos 3m x 3m (1.111 árv.ha^{-1}).

A empresa Klabin adota um sistema de produção florestal que fornece cavaco para a fabricação de celulose e para a fabricação do coproduto (biomassa residual para cogeração), neste caso, seria a ponteira da árvore de *Eucalyptus*

grandis, e seus respectivos galhos. O processo de colheita empregada pela empresa é denominado de *Full-tree* (Árvore-Inteira), sendo este método criado pelos norte-americanos e consiste na derrubada e arraste da árvore inteira até a beira do talhão ou mesmo em um pátio intermediário, onde posteriormente serão processadas (RODRIGUES, 2018). Este método conta com um sistema mecanizado, composto pela seguinte configuração: colheita: *feller buncher*, *skidder*, processador/garra traçadora (Figura 3.1). Biomassa: picador; carregadeira; *skidder* (apoio).

Figura 3.1. Processo de colheita visando a matéria-prima para fabricação de celulose e coproduto, nas áreas da Klabin de Telêmaco Borba-PR.



Fonte. Autor.

Através do processamento no campo, utilizando a garra traçadora, separa-se o fuste direcionado a celulose (descascado, peneirado e picado na empresa) e o fuste denominado de "coproduto" (Picado no campo: Energia – Figura 3.2). É importante salientar que a ponteira do Pinus é acompanhada de galhos grossos, o que não ocorre no Eucalipto. No caso do Eucalipto a casca se acumula entre o fuste destinado à celulose e o coproduto para energia, já a casca do Pinus é picada juntamente com o material lenhoso para queima direta em caldeira. A casca do Eucalipto possui alta resistência a tração, onde normalmente se apresenta no campo em forma de tiras, prejudicando consideravelmente os equipamentos de transporte por rosca sem fim que leva o cavaco até a caldeira, podendo ocorrer interrupções de processo e até mesmo acidentes. Outro problema são os picadores utilizados para cavaco, pois não conseguem processar a casca do Eucalipto devido a suas características, sendo necessário um picador específico para este tipo de biomassa.

Figura 3.2. Coproduto baldeado pronto para o processo de picagem.

Fonte. Autor.

O picador utilizado pela empresa é do tipo CBI, exclusivamente para o processo da picagem de biomassa residual. A quantidade de árvores e dados dendrométricos são adquiridos através do inventário florestal pré-corte. Para estimativa da produção de cavaco em tonelada, torna-se necessário fazer análises laboratoriais do teor de umidade e densidade, referentes ao coproduto neste caso.

Figura 3.3. Picador florestal CBI posicionado para o carregamento dos caminhões.

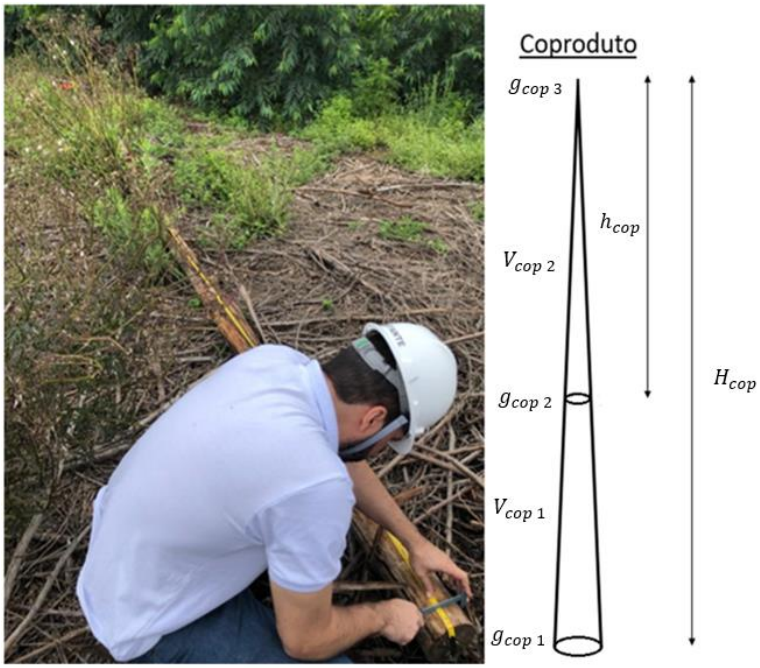
Fonte. Autor.

3.3.3 Cubagem Rigorosa do Coproduto

A cubagem rigorosa é um método utilizado na Engenharia Florestal para quantificação da volumetria do tronco da árvore, ou de uma seção do mesmo (altura comercial), sendo imprescindível para aferição volumétrica de florestas. Ao seccionar o tronco, ou neste caso o coproduto, calcula-se separadamente o volume de cada seção para posteriormente serem somadas ($V_{cop\ 1} + V_{cop\ 2}$), objetivando a obtenção do volume total.

É importante salientar que o volume da árvore depende de três variáveis independentes: Diâmetro na Altura do Peito (DAP), Altura e forma. No caso do coproduto o DAP seria substituído pelo diâmetro da base. Na prática, as aferições destas medidas podem ser realizadas em vários níveis de dificuldade e diferentes equipamentos (GUIMARÃES, 1985). O método de cubagem é indicado para o coproduto, pois representa uma seção da árvore, no caso do Eucalipto utiliza-se a ponteira. Já em relação ao Pinus, há uma complexidade maior para medição do volume residual pelo fato da ponteira estar acompanhada por galhos de diversos tamanhos e formas, não sendo um resíduo padronizado como no caso do Eucalipto.

Figura 3.4. Cubagem do coproduto a campo, onde: $\boldsymbol{V_{cop\,1}}$ (volume da primeira seção), $\boldsymbol{V_{cop\,2}}$ (volume da segunda seção), $\boldsymbol{g_{cop\,1}}$ (diâmetro da base), $\boldsymbol{d_{cop\,2}}$ (diâmetro no meio), $\boldsymbol{d_{cop\,3}}$ (diâmetro da ponta), $\boldsymbol{H_{cop}}$ (altura total) e $\boldsymbol{h_{cop}}$ ($\boldsymbol{H_{cop}}/2$).



Fonte. Autor.

Para o cálculo do volume do coproduto foi utilizado a método de *Smalian*. Segundo Machado e Filho (2003) os cálculos devem seguir como mostra a Expressão 8:

$$V_{cop\,i} = \frac{g_{cop\,i} + g_{cop\,i+1}}{2} \times H_{cop} \tag{8}$$

Onde:

V_{cop}: Volume da seção do coproduto (m³);

$g_{cop\,i}$: Área da base do coproduto (m²);

H: Comprimento da seção do coproduto (m);

i: Número de seções do coproduto.

A área da base (g_i) é calculado por meio da Expressão 9:

$$g_{cop\,i} = \frac{\pi \times {d_{cop\,i}}^2}{4} \tag{9}$$

Onde:

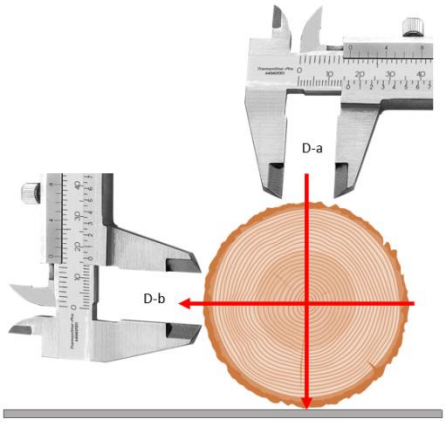
$g_{cop\,i}$: Área da base da seção i coproduto (m²);

$d_{cop\,i}$: Diâmetros do coproduto

Para aferição das medidas no coproduto, utilizou-se uma fita métrica para aferir a altura (Figura 3.4.) e um paquímetro para os diâmetros (Figura 3.5.). Os respectivos diâmetros foram medidos em dois pontos, sendo calculado através da média das duas medidas (D-a e D-b), pois este procedimento ajuda a evitar erros relacionados a forma do

coproduto. Optou-se por utilizar o paquímetro de precisão em função da dificuldade operacional de empregar o uso da fita métrica para este caso. Em plantios florestais para a aferição destas medidas é utilizado um equipamento chamado "Suta", muito parecido com um paquímetro, mas de maiores dimensões.

Figura 3.5. Método de duas aferições do diâmetro em cada ponto de interesse no coproduto.



Fonte. Autor.

3.3.4 Ajuste de modelos de produção para coproduto

Para os ajustes dos modelos de produção contidos na Tabela 3.1., cubou-se um total de 66 coprodutos, em 4 classes de diâmetro (classes de *Sturges*). Foram escolhidos 4 modelos básicos de simples entrada para estimar o montante de cavaco produzido em m³. Optou-se por utilizar modelos de simples entrada, pela facilidade de obtenção do diâmetro da base do coproduto com um paquímetro. A aferição da altura do coproduto é aconselhada somente para o ajuste dos modelos para a determinação dos volumes, isso se deve à periculosidade de retirar os coprodutos da pilha para medição. Recomenda-se que a equipe responsável pela coleta destes dados utilize os Equipamentos de Proteção Individual (EPI's) adequados.

Tabela 3.1. Modelos matemáticos utilizados no ajuste dos dados volumétricos de coproduto.

Número	Nome	Modelo
1	Linear simples	$V_{cop} = b0 + b1 * d_{cop}$
2	Linear quadrática	$V_{cop} = b0 + b1 * d_{cop} + b2 * {d_{cop}}^2$
3	Não linear exponencial	$V_{cop} = b0 * e^{b1 * d_{cop}}$
4	Não linear potência	$V_{cop} = b0 * {d_{cop}}^{b1}$

Fonte. Autor

Para avaliar o melhor modelo matemático para estimativa do volume (m³) do coproduto, foram utilizados cinco critérios estatísticos: a) Critério de Informação de Akaike (AIC), b) R^2 ajustado, c) Erro padrão da estimativa (Syx %), d) P-Valor e e) Distribuição de Resíduos.

a) Critério de Informação de Akaike (AIC)

De acordo com Emiliano et al. (2010) se for possível obter uma boa estimativa para verossimilhança através dos dados coletados, o resultado pode ser utilizado como um critério para comparação dos modelos matemáticos. De acordo com Akaike (1974) a análise de máxima verossimilhança é simples e muito eficiente para identificar o melhor ajuste de modelos matemáticos. O autor demostrou que a tendência dos dados é assintótica dependendo número de parâmetros do modelo, fazendo com que o mesmo seja sensível às pequenas variações dos parâmetros em torno dos valores reais.

O critério do inglês *Akaike's information criterion*, define o melhor modelo pelo resultado mais baixo, conforme Expressão 10:

$$AIC = -2Log \times L + 2p \tag{10}$$

Onde:

AIC: critério de informação de Akaike;
L: máximo da função de verossimilhança;
p: número de parâmetros do modelo.

b) Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2ajust.)

O R^2 é um parâmetro muito utilizado no meio florestal para ranqueamento de modelos matemáticos, tanto para a altura, quanto para o volume da árvore. De acordo com Batista (2004) o tamanho relativo da Soma de Quadrados do Modelo (SQM) em relação à Soma de Quadrados Totais (SQT) é uma forma natural de se comparar a qualidade de ajustes de modelos matemáticos de predição. No meio florestal este valor normalmente oscila de 0 a 1, onde 0 mostra que os dados não se ajustaram ao modelo e 1 os dados se ajustaram perfeitamente. Porém, não existe uma escala absoluta, isso dependerá do tipo de dados e como se aplicará a regressão para considerar um bom ajuste do modelo. Já o R^2 ajust. é calculado levando em consideração a quantidade de preditores do modelo.

Segundo Batista (2004) o R^2 é calculado:

$$R^2 = \frac{SQM}{SQT} \tag{11}$$

Onde:
R^2: coeficiente de determinação;
SQM: soma dos quadrados do modelo;
SQT: soma dos quadrados totais.

E o $R^2_{ajust.}$ é calculado conforme a Expressão 12:

$$R^2_{ajust.} = 1 - (1 - R^2) \times \frac{n-1}{n-k} \tag{12}$$

Onde:
$R^2_{ajust.}$: coeficiente de determinação ajustado;
R^2: coeficiente de determinação;

k: número de graus de liberdade;

n: número de observações.

c) Erro padrão da estimativa (Syx%)

O erro padrão da estimativa em porcentagem segundo Soares et al. (2011) mostra quanto o modelo erra em estimar a variável independente, é calculado a partir da Expressão 13:

$$Syx\ \% = \frac{\sqrt{QMR}}{\bar{V}_{cop}} \quad (13)$$

Onde:

$Syx\ \%$: Erro padrão da estimativa;

QMR: Quadrado médio dos Resíduos;

$\bar{V}_{cop}$: Média dos volumes observados.

d) P-Valor

O P-valor é também chamado de probabilidade de significância, e é calculado utilizando a distribuição amostral sob a hipótese nula, sendo definido por Victor e Paes (2010) como:

> *"O menor nível de significância para qual uma hipótese nula pode ser rejeitada, em outras palavras, diz o quão provável seria obter amostra como a que foi obtida, supondo que as diferenças observadas se devem ao acaso ou à variação natural das medidas".*

Normalmente, assume-se um valor de 0,05 para rejeitar a hipótese H_0, ou seja, quando a diferença entre eles é inexistente, um *outlier* é esperado em menos de 5% das ocasiões (FERREIRA; PATINO, 2015).

e) Distribuição de Resíduos

A distribuição de resíduos é muito utilizada no ranqueamento de modelos e dá uma visão geral da disposição dos dados estimados. Um modelo se ajusta bem quando a dispersão dos valores reais em relação à curva estimada na distribuição de resíduo não apresenta característica de heterocedasticidade[9], quanto mais próximo os pontos estiverem da curva, melhor é o ajuste. O desvio padrão tem a característica de avaliar os valores absolutos médios dos resíduos, mas um programa pode calcular para todas as árvores (ou coprodutos) da amostra e plota-los em um gráfico (x,y) de coordenadas cartesianas, facilitando a visualização dos *outlier*[10] (GOMES; GARCIA, 1993).

[9] Fenômeno estatístico que ocorre quando os valores apresentam variâncias heterogêneas em relação a um plano cartesiano.
[10] Pontos que se localizam fora do intervalo médio de dados, valor que foge da normalidade.

3.3.5 Análise de dados

Utilizou-se para o processamento dos dados os programas R® e Microsoft Excel® e os modelos foram ajustados por regressão linear e não-linear. A Universidade de São Paulo possui licença de todos os programas citados.

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Ajuste de modelos de produção para coproduto

Foram ajustados 4 modelos para estimar a produtividade em m³, utilizando dados de diâmetros e alturas de 66 coprodutos. Os modelos escolhidos foram: linear simples (1), linear quadrático (2), não linear exponencial (3) e não linear potência (4). Para determinar qual o melhor modelo ajustado, foram utilizados o critério de informação de Akaike (AIC), Coeficiente de Determinação Ajustado (R²ajust.), o Erro Padrão da Estimativa (Syx %), P-valor e a distribuição gráfica de resíduos (%).

Na Tabela 3.2. encontram-se os valores dos critérios de seleção dos modelos (AIC, R²ajust., Syx % e o P-valor), sendo o que menos se ajustou aos dados foi o modelo 1 e o que melhor se ajustou foi o modelo 4. Apesar da pequena diferença entre os critérios é possível visualizar detalhadamente na distribuição de resíduos ilustrada na Figura 3.6.

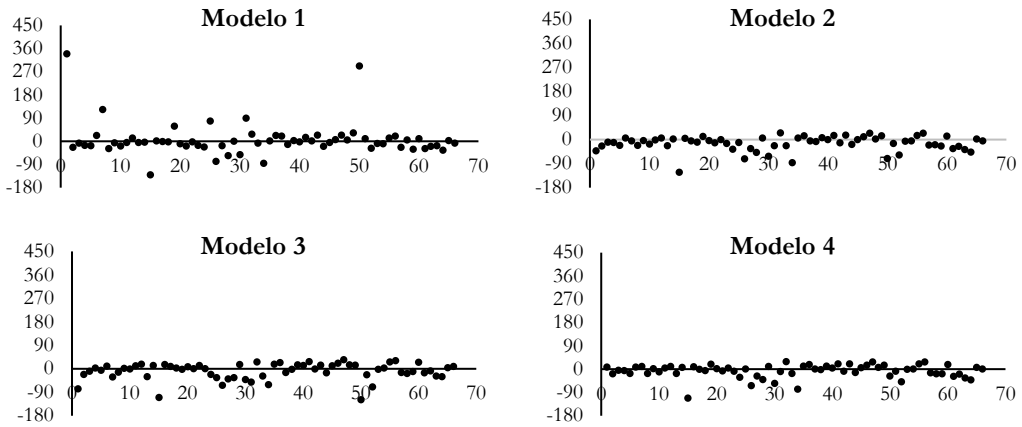
Tabela 3.2. Coeficientes (*b*0, *b*1 e *b*2) e estatísticas referentes aos modelos 1, 2, 3 e 4 para variável volume do coproduto ($\boldsymbol{V_{cop}}$) em relação ao diâmetro do coproduto ($\boldsymbol{d_{cop}}$).

Modelo	Parâmetros			AIC	$R^2_{ajust.}$	*Syx %*	*P-valor*
	$b0$	$b1$	$b2$				
1	-0,0384	0,0072	-	-475,8757	0,8178	0,0741	<0,01
2	0,0158	-0,0061	0,0008	-498,2985	0,8704	0,0651	<0,01
3	0,0015	0,3005	-	-500,1825	0,8719	0,0624	<0,01
4	0,00004	2,9210	-	-501,4267	0,8730	0,0621	<0,01

Fonte. Autor.

Oda-Souza et al. (2008) estudando *Eucalyptus dunnii* no estado de São Paulo, utilizaram o AIC para comparação no ajuste de modelos geoestatísticos em relação ao espaçamento de plantio. As estatísticas de ajuste dos modelos obtiveram valores de AIC próximos ao da presente pesquisa, além do mais, os valores do Coeficiente de Determinação Ajustada (R²ajust.), o erro amostral (Syx %), P-valor e a distribuição gráfica dos resíduos (%) corroboram para a confirmação da qualidade do ajuste. O AIC não é utilizado na área florestal como opção de requeamento de modelos volumétricos, mas apresentou resultados equivalentes aos outros critérios, sendo assim é mais uma opção para a seleção de modelos direcionados a área florestal. Por meio da distribuição gráficas dos resíduos é possível observar uma maior proximidade dos pontos em relação ao eixo x do modelo 4, sendo que, a pior distribuição observada no modelo 1.

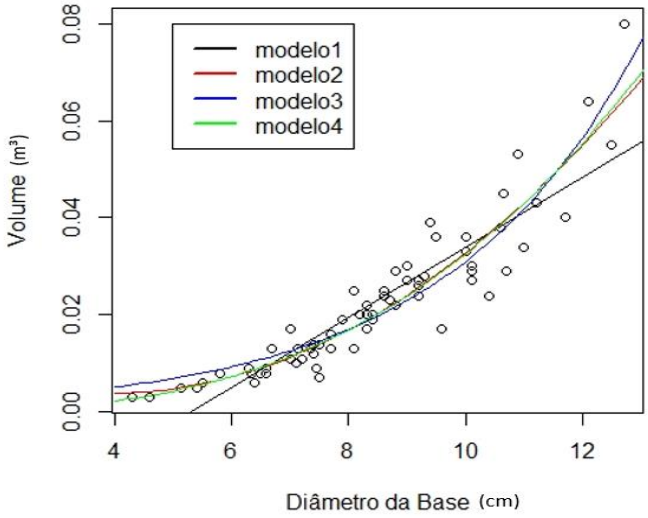
Figura 3.6. Distribuição de resíduos para os quatro modelos testados (eixo y: resíduos em % / eixo x: volume em m³).



Fonte. Autor.

Em todos os quesitos o modelo 4 é o que melhor se ajustou aos dados apresentados, o que pode ser verificado informalmente no gráfico abaixo.

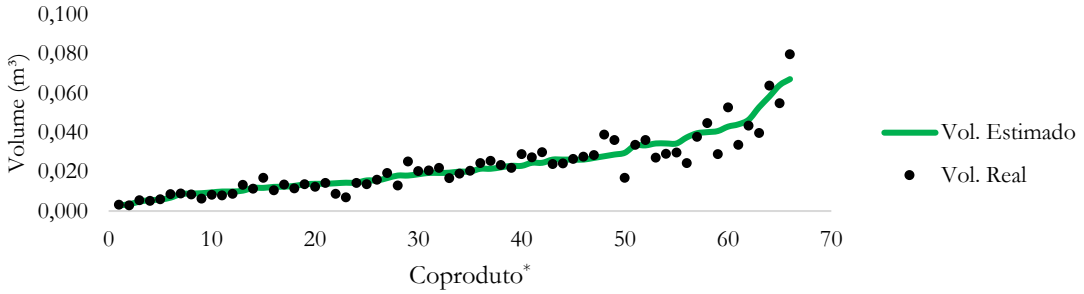
Figura 3.7. Gráfico de distribuição dos valores reais (linhas) e dados observados (pontos) dos quatro modelos ajustados no programa R.



Fonte. Autor.

O volume real total dos 66 coprodutos foi de 1,485 m³ e o modelo escolhido chegou a um valor de 1,522 m³, diferença de 2,4%. No gráfico ilustrado na Figura 3.8 estão presentes os dados reais destacados na cor preta (volume real do coproduto) e na linha destacada em verde os valores estimados utilizando o modelo não-linear em potência (modelo 4) do coproduto em m³.

Figura 3.8. Gráfico de distribuição dos valores reais (linhas) e dados observados (pontos) do modelo que melhor se ajustou (modelo 4).



Fonte. Autor. *valores referentes aos 66 coprodutos coletados em ordem crescente.

O modelo ajustado pode ser aplicado para qualquer Tempo de Permanência no Campo (TPC), pois não apresentou diferença estatística entre os diâmetros da base (Fcalc.= 0,052 < Ftab= 0,9498) e entre os volumes dos coprodutos (Fcalc.= 0,491 < Ftab= 0,6145), entre as TPC's 90 dias (médias = dcop.: 8,3 cm/ Volcop.: 0,0221 m^3), 150 dias (média = dcop.: 8,1 cm/ Volcop.: 0,0188 m^3) e 320 dias (média = dcop.: 8,2 cm/ Volcop.: 0,0236m^3).

Com o modelo ajustado é possível pré-determinar a produtividade em m^3 com precisão e somados as análises laboratoriais, no caso a densidade e o poder calorífico, a estimativa do montante em toneladas e a quantidade de energia atribuída ao cavaco.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS – CAPÍTULO 3

A utilização de modelos matemáticos para prever o volume de cavaco produzido em cada talhão, ajudará no planejamento futuro e nas estratégias energéticas da empresa. No caso do modelo atual ajustado, faz-se necessário coletar alguns diâmetros de coproduto na pilha, verificar a quantidade de árvores do talhão e após o ajuste, o modelo fornecerá o volume de coproduto destinado à energia. O montante encontrado em m^3 deve ser multiplicado pela densidade básica, assim há uma estimativa da produtividade de cada local em toneladas.

Especificamente, dos quatro modelos o que melhor se ajustou aos dados foi o não linear em potência (modelo número 4), onde os parâmetros estatísticos apresentaram valores significativos (AIC: -501,4267 / $R^2_{ajust.}$: 0,8730 / Syx %: 0,0621 / P-valor: <0,01), enfatizado pelo pela distribuição de resíduos. O volume real total dos 66 coprodutos foi de 1,485 m^3 e o modelo escolhido estimou um valor de 1,522 m^3, diferença de 2,4%. O modelo 4 pode ser aplicado para qualquer Tempo de Permanência no Campo (TPC), pois não apresentou diferença estatística entre os diâmetros da base e entre os volumes dos coprodutos, nas TPC's 90, 150 e 320 dias. Este modelo estima o volume de madeira do coproduto em m^3, sendo necessário a análise de densidade para que possa aferir a produção do local em toneladas de cavaco, bem como o poder calorífico para o potencial energético.

REFERÊNCIAS

ABRAF. **Anuário Estatístico ABRAF 2013**. Brasília - DF: ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, 2013. Disponível em: <http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-abraf13-br.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2018.

BATISTA, J. L. F. **Análise de Regressão Aplicada**: 1. Piracicaba - SP: Departamento de Ciências Florestais ESALQ - USP, 2004. Disponível em: <http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=biometria:encontros:applied-regression.pdf>.

EMILIANO, P. C. et al. Critérios de informação de Akaike versus Bayesiano: análise comparativa. (Poster session). **19º Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística**, p. 6, 2010.

ENCINAS, J. I.; SILVA, G. F. DA; PINTO, J. R. R. **Comunicações Técnicas Florestais**. 1. ed. Brasília - DF: Departamento de Engenharia Florestal - UNB, 2005. v. 7

FERREIRA, J. C.; PATINO, C. M. O que realmente significa o valor-p? **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 41, n. 5, p. 485–485, 2015.

FONSECA, A. et al. **Sistema de Alerta de Desmatamento Maio de 2021Boletim do desmatamento da Amazônia Legal (junho 2021) SAD**. Brasil: Sistema de Alerta de desmatamento - SAD, 2021. Disponível em: <https://imazon.org.br/wp-content/uploads/2021/06/SADMaio2021.pdf>.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **A determinação de equações volumétricas na engenharia florestalIPEF Série Técnica**. Piracicaba - SP: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - IPEF, 1993. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr26/cap01.pdf>.

GUIMARÃES, D. P. **Estimativa do Volume de Eucalyptus spp . através de Posições Absolutas no Tronco .** [s.l.] Universidade Federal do Paraná - UFPR, 1985.

IBÁ. **Relatório Anual 2019 - Indústria Brasileira de ÁrvoresRelatório**. Brasilia-DF, Brasil: Indústria Brasileira de Árvores, 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>.

MACHADO, S. DO A.; CONCEIÇÃO, M. B. DA; FIGUEIREDO, D. J. DE. Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de Pinus oocarpa. **RECEN - Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 4, n. 2, p. 185–197, 2002.

MACHADO, S. DO A.; FILHO, A. F. Dendrometria. In: FILHO, A. F. (Ed.). . 1. ed. Curitiba - PR: [s.n.]. p. 309.

ODA-SOUZA, M. et al. Aplicação de Métodos Geoestatísticos Para Identificação de Dependência Espacial Na Análise de Dados de Um Ensaio de Espaçamento Florestal em Delineamento Sistemático Tipo Leque. **Revista Árvore**, v. 32, n. 2, p. 499–509, 2008.

PACHECO, J. M. **Influência do Espaçamento no Crescimento de Pinus taeda L. na Região Centro-Sul do Paraná**. Irati - PR, Brasil: Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO, 2013.

RODRIGUES, C. K. **Colheita e transporte florestal**. Curitiba, PR: ., 2018.

RODRIGUES, L. H. et al. **Pesquisa operacional : programação linear passo a passo : do entendimento do problema à interpretação da solução**. São Leopoldo - RS: Unisinos - Escola de Gestão e Negócios, 2014.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. D. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719–734, 1933.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. DE P.; SOUZA, A. L. DE. **Dendrometria e inventário florestal**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2011.

SPURR, S. H. **Forest inventory**New York, USAThe Ronald Press Company, , 1952.

VICTOR, E. DA S.; PAES, Â. T. Reflexões sobre a importância do valor p – parte 1. **Einstein – Educação Continuada em Saúde: Por dentro da estatística**, v. 8, p. 109–110, 2010.

4. POTENCIAL ENERGÉTICO DE CAVACO RESIDUAL DE FLORESTAS de *Eucalyptus grandis*

RESUMO

Os cavacos produzidos a partir de resíduos de florestas possuem uma qualidade inferior ao cavaco direcionado a produção de celulose, pois o processo exige uma matéria-prima livre de contaminantes. Os cavacos para energia apresentam grande quantidade de resíduos indesejados, a vantagem é que caldeiras para esta finalidade toleram um determinado volume de impurezas (terra, pedra, finos de madeira, etc.). A otimização da produtividade é relacionada ao encontro do ótimo, representado pelo valor mínimo ou máximo de uma variável, ou grandeza. Foram analisados dois tipos de cavacos de *Eucalyptus grandis* destinados à energia, em duas diferentes TPC's (254 e 350 dias de permanência no campo), sendo verificado o teor de umidade (%), densidade (g/cm³), teor de cinzas 550 e 950°C (%) e poder calorífico superior (kcal/kg). Foram também medidos 10 coprodutos através da cubagem rigorosa em 4 classes de dímetros. Calculou-se o volume da biomassa destinada a energia e a biomassa direcionado para a celulose, no caso se as dimensões do coproduto fossem aumentadas ou diminuídas em 5, 10 e 15 cm. O teor de umidade (%) do coproduto foi 23% maior na TPC 350 que na TPC 254, a densidade básica (g/cm³) da TPC 240 foi 8% maior que na TPC 350. O teor de cinza (%) foi o que obteve maior diferença, onde na temperatura 500°C e 950°C são 44% e 48% maior na TPC 350. O poder calorífico é 6% maior na TPC 254 que na 350, sendo que o material perde por volta de 316 Kcal/kg. O Índice de Valor Combustível (IVC) foi maior quando a biomassa permaneceu menos tempo no campo (TPC 254), ocorreu uma variação de 66% em relação ao teor de cinzas 550 °C e 63% no TC 950 °C. Com relação à diferença na proporção do volume para energia, esta foi de 13, 19 e 24% (5, 10 e 15 cm) maior que o montante destinado para celulose devido à conicidade da árvore. A diferença na receita bruta da celulose foi maior em comparação com a geração de energia entre os tamanhos 5, 10 e 15 cm, onde a diferença foi de 47%, 42% e 39%, respectivamente.

Palavras-chave: Poder calorífico, Teor de Cinzas, Cubagem, Fator de Forma.

ABSTRACT

The wood chips produced from forest residues have a lower quality than the wood chips directed to pulp production, due to the process requiring a raw material free from contaminants. The wood chips for energy present a large amount of unwanted residues, the advantage is that boilers for this purpose tolerate a certain volume of impurities (dirt, stone, wood fines, etc.). The productivity optimization is related to finding the optimum, represented by the minimum or maximum value of a variable. Two types of *Eucalyptus grandis* wood chips destined for energy were analyzed, in two different TPF's (254 and 350 days of permanence in the field), being verified the moisture content (%), density (g/cm³), ash content 550 and 950°C (%) and higher calorific value (kcal/kg). Ten co-products were also measured through rigorous cubing, in 4 diameter classes. The volume of biomass destined for energy and the biomass destined for cellulose was calculated, in the case if the dimensions of the co-product were increased or decreased by 5, 10 and 15 cm. The co-product presented 23% more moisture content (%) in TPC 350 than in TPF 254, the basic density (g/cm³) of TPF 240 was 8% higher than in TPF 350. The ash content (%) was which obtained the biggest difference where at temperature 500°C and 950°C are 44% and 48% higher in TPF 350. The calorific value is 6% higher in the TPF 254 than in the 350, and the material loses around 316 Kcal/kg. The Fuel Value Index (IVC) was higher when the biomass remained in the field for less time (TPC 254), there was a variation of 66% in relation to ash content at 550 °C and 63% at TC 950 °C. Regarding the difference in the proportion of volume for energy, it was 13, 19 and 24% (5, 10 and 15 cm) higher than the amount destined for pulp, due to the conicity of the tree. The difference in the economic gain of cellulose was higher compared to energy generation, between sizes 5, 10 and 15 cm, where the difference was 47%, 42% and 39%, respectively.

Keywords: Calorific value, Ash Content, Cubage, Form Factor.

4.1 INTRODUÇÃO

Para a utilização otimizada dos produtos florestais oriundos de florestas nativas ou de reflorestamentos, faz-se necessário o controle matemático dos suprimentos de matéria-prima para o funcionamento permanente da empresa, visando sempre a conservação ambiental. Para um planejamento escalonado é necessária uma vasta coleta de dados e posteriormente o seu processamento, objetivando assim, compreender a dinâmica do produto na cadeia de suprimento. A mensuração florestal é consolidada quando em relação às estimativas de crescimento e produção de

árvores, mas ainda é pouco utilizada em áreas afins, como é o caso da bioenergia. Em consequência do longo processo de coleta de dados e um custo relativamente alto para sua realização, muitas empresas preferem adotar outras estratégias. Pode-se citar alguns exemplos de áreas afins que se aplicam técnicas de quantificação e modelagem matemática, como a tecnologia da madeira no desdobramento de toras em tábuas, na medição utilizando laser ou mesmo na predição de valores de resíduos florestais na cogeração de energia.

De acordo com Arce (2007) a otimização da produtividade é relacionada ao encontro do ótimo, representado pelo valor mínimo ou máximo de uma variável, ou grandeza analisada. É importante salientar que a procura da otimização é bem agressiva em se tratando da busca do min/máx. de determinada característica. Para que determinado problema seja resolvido corretamente ele deve obedecer 5 pontos: enunciado (exposição clara a ser resolvida), formulação (tradução da linguagem coloquial em matemática), resolução (linguagem matemática), interpretação (tradução da linguagem matemática em coloquial). No caso dos reflorestamentos, a otimização ocorre na utilização consciente e controlada dos recursos disponíveis, como é o caso da geração de energia a partir de resíduos, trazendo vantagens financeiras e evitando que este material se acumule em desuso no campo.

Os cavacos produzidos a partir de resíduos de florestas possuem uma qualidade inferior ao cavaco direcionado a produção de celulose, normalmente são utilizados galhos mais grossos (>8cm) e as ponteiras das árvores. Este resíduo apresenta quantidades elevadas de partes indesejadas (terra, pedra e cascas), já o cavaco direcionado a fabricação de celulose passa por um processo mais refinado, sendo este produzido com o fuste da árvore. A madeira direcionada a energia é utilizada para este fim na forma de tora, cavaco, pellets e/ou briquetes.

O Eucalipto foi consolidado na fabricação de papel *kraft* nos anos 60, posteriormente a produção deste material foi difundida em vários países, principalmente em fábricas não integradas que compravam celulose. Ao longo do tempo as plantas de produção integrada apresentaram grande retorno econômico, especialmente na fabricação de papel para escrita (FOELKEL, 2009). Segundo Freitas (2013) para a fabricação de 1 tonelada de celulose é necessário em média de 1,876 toneladas de madeira de Eucalipto seca e peneirada ou 3,75 m³. A madeira do Eucalipto é também consolidada para geração e cogeração de energia, tanto em empresas do ramo florestal, quanto em companhias de outras áreas, gerando energia para sua linha de produção. Em consequência do rápido crescimento do gênero *Eucalyptus* (ciclo de aproximadamente 7 anos) e sua vasta quantidade de espécies espalhadas por diferentes regiões do globo, muitas empresas optam por sua escolha. Podem ser citados o caso do *Eucalyptus benthamii* na região Sul do Brasil onde é adaptado ao clima frio com predominância de fortes geadas (GRAÇA; TAVARES, 1999) e do *Eucalytus microtheca* nas regiões da Austrália, com características de resistência ao clima seco que é predominante em certas localidades na Oceania (LI et al., 2000).

Este capítulo procurou entender parâmetros como o teor de umidade, densidade, poder calorífico, teor de cinzas e índice de valor de combustível (IVC) para dois diferentes tempos de permanência no campo (TPC – 254 e 350 dias), objetivando assim, estimar a capacidade energética. Foi analisado também a volumetria do coproduto, comparando-o com diferentes tamanhos ao longo da seção, em dois diferentes destinos (celulose ou energia).

4.2 OBJETIVO DO CAPÍTULO

O objetivo geral deste capítulo foi analisar parâmetros do cavaco de coproduto como: teor de umidade, densidade, poder calorífico, teor de cinzas e índice de valor de combustível (IVC) em duas diferentes TPC's (254 e 350 dias), visando verificar a influência do tempo nas características energéticas do cavaco residual. Também foi comparado o montante produzido de cavaco residual, caso haja variação no tamanho do coproduto. Em caso de diminuição do

tamanho do coproduto, mais matéria-prima é direcionada a produção de celulose, ocorrendo aumento, mais biomassa será disponibilizado para suprimento de energia.

4.2.1 Objetivo específico

- Comparação entre teor de umidade (%), densidade (g/cm³), poder calorífico (kcal/kg), teor de cinzas (%) e Índice de valor de combustível (IVC) para duas TPC's diferentes (254 e 350 dias);

- Comparação entre volumetria do coproduto direcionado a produção de cavaco residual para energia (coproduto) e cavaco destinado à produção de celulose em um talhão localizado nas áreas da Klabin – Telêmaco Borba/PR;

- Estimativa de capacidade produtiva e geração de energia para o talhão analisado, em duas diferentes TPC's (254 e 350 dias).

4.3 MATERIAL E MÉTODO

4.3.1 Análises laboratoriais

As amostras coletadas no campo foram analisadas pelo laboratório de celulose e papel, nas dependências do SENAI de Telêmaco Borba/PR, sendo realizadas análises de teor de umidade, densidade básica, teor de cinzas e poder calorífico. O poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico útil (PCU), foram calculados utilizando as Expressões 14 e 15, conforme sugerido por Brito (1993):

$$PCI = PCS - 324 \quad (14)$$

Onde:

PCI: Poder calorífico inferior (kg/kcal);

PCS: Poder calorífico superior (kg/kcal).

$$PCU = PCI \times \frac{(100 - U)}{100} - 6 \times U \quad (15)$$

Onde:

PCU: Poder calorífico útil (kg/kcal);

PCI: Poder calorífico inferior (kg/kcal);

U: Teor de umidade (%).

4.3.2 Potencial energético

Com os dados de volume do coproduto, densidade básica e poder calorífico inferior foi possível calcular o potencial energético do montante de biomassa acrescido ao coproduto (5, 10 e 15 cm). A expressão matemática utilizada foi adaptada do Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo – IEE/USP (COELHO et al., 2020) em relação a resíduos de reflorestamentos, como mostra a Expressão 16.

$$E = \left(Vol_{cop} \times DB\right) \times PCI \times \eta \quad (16)$$

Onde:

E = Energia elétrica disponível (MWh);

Vol_{cop}= Volume do coproduto (m^3);

DB= Densidade Básica (t/m^3);

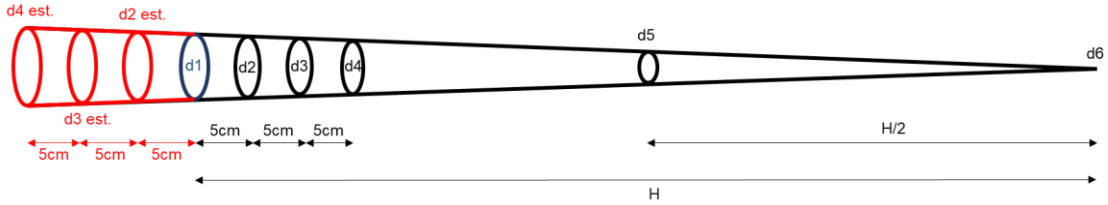
PCI = Poder Calorífico Inferior (MWh/t);

η = Eficiência de conversão elétrica (%).

4.3.3 Proporção volumétrica de madeira para celulose e para energia (coproduto)

Para o cálculo de volume foi realizado a cubagem rigorosa de dez coprodutos, distribuídos em quatro classes de diâmetro, objetivando calcular os volumes das seções e estimar a parte destacada em vermelho da Figura 4.1. O d1 representa o diâmetro da base do coproduto, sendo d1, d2, d3, d4, d5, d6, H, medidos no campo e d2 est, d3 est e d4 estimados através do fator de forma inverso. Este experimento tem por finalidade verificar o montante destinado para celulose (diminuir o coproduto em 5, 10 e 15 cm) ou para energia (aumento do coproduto em 5, 10 e 15 cm), variando o tamanho do coproduto em 5 cm.

Figura 4.1. Amostragem dos parâmetros para determinação do volume.



Fonte. Autor

Através das medidas coletadas, chegou-se a um fator de forma para cada seção, realizando a estimativa que está destacada em vermelho (Figura 4.1). Isto é importante para identificar as perdas e os ganhos de volume de madeira (celulose x energia – m^3) caso o tamanho do coproduto fosse aumentado ou diminuído.

Para a estimativa do volume do coproduto (Figura 4.1- em vermelho), optou-se por utilizar o método do fator de forma, onde é definido como sendo a conversão do volume do cilindro para o volume real, muito utilizado na área florestal para determinar a conicidade do fuste ou de uma seção do mesmo (FIGUEIREDO; SCHROEDER; PAPA, 2009). Este cálculo consiste em dividir o volume real pelo volume do cilindro, seu resultado oscila entre 1 (cilindro) e 0 (cone), dependendo da forma do tronco (coproduto). O inverso foi calculado para estimar a área em vermelho da Figura 4.1, como mostra as Expressões 17 e 18:

$$f = {}^{Vol_{real}}/_{Vol_{cil.}} \quad (17)$$

$$f^{-1} = {}^{Vol_{cil.}}/_{Vol_{real}} \quad (18)$$

Onde:

f: Fator de forma;

Vol_{real}: Volume real da seção do coproduto (m³);

$Vol_{cil.}$: Volume do cilindro referente a base maior (m³).

4.3.4 Sistema de Cogeração de Energia

A empresa Klabin conta com duas caldeiras para cogeração de energia utilizando biomassa residual de florestas, uma com leito fluidizado borbulhante (150 t/h de vapor – 40 bar 430°C) e a outra com leito fluidizado circulante (250 t/h de vapor – 100 bar - 500°C). A quantidade de cavaco residual (mix de resíduos próprios e comprado de terceiros) utilizada pela empresa para a geração de energia é de 2.000 ton.dia^{-1}. São dois tipos de turbo-geradores utilizados para cogeração: o primeiro referente a 40 bar e com uma geração máxima de 23 MW; o segundo seria de 100 bar e com sistema de condensação, onde sua capacidade máxima é de 65 MW.

4.4 RESULTADOS

4.4.1 Análise de parâmetros em Dois Diferentes Tempos de Permanência no Campo (TPC)

Para esta etapa foram analisados dois tipos de cavacos de *Eucalyptus grandis* destinados à energia, em duas diferentes TPC's (254 e 350 dias de permanência no campo), sendo verificado o teor de umidade (%), densidade (g/cm³), teor de cinzas 550 e 950°C em % e poder calorífico superior (kcal/kg). As amostras foram armazenadas em sacos devidamente identificados, com duas repetições e conduzidos ao laboratório de polpa e papel do SENAI – Telêmaco Borda – PR. O principal motivo para esta análise é verificar se há diferença nos parâmetros testados em relação ao tempo de permanência no campo deste material, pois este normalmente é estocado no campo pela empresa por volta de 365 dias.

Figura 4.2. Amostras de cavaco direcionado a energia em duas TPC's (254 dias e 350 dias).

Fonte. Autor

Na Tabela 4.1. constam os resultados dos parâmetros de teor de umidade, densidade básica, teor de cinzas e Poder Calorífico Superior, Inferior e Útil para as duas TPC's testadas. Comparando o teor de umidade entre TPC's, houve uma diferença de 5% (porcentagem equivalente de 23%), isso, provavelmente é devido ao aumento de

porosidade na madeira pelo tempo extra no campo. No mesmo ocorre com a densidade básica, obtendo valores superiores quando a biomassa permanece menos tempo no campo, cerca de 8% mais denso o cavaco da TPC 254 em relação a de 350 dias. O teor de cinzas foi onde ocorreu a maior diferença, por volta de 48% a 500°C e 44% a 950°C.

De acordo com PEREIRA et al. (2000) o teor de cinzas do gênero *Eucalyptus,* usualmente varia entre 0,5% a mais de 5%, isso é inerente a espécie utilizada na combustão, da porcentagem de casca, terra, areia presente, entre outros contaminantes. Teores muito elevados de cinzas exigem limpezas mais frequentes e podem provocar corrosão em equipamentos metálicos. Segundo o mesmo autor um carvão vegetal de boa qualidade deve apresentar um teor de cinzas inferior a 3%.

Analisando a densidade básica entre TPC's ocorreu uma diferença de 8% (≠ 0,036 g/cm³). A TPC 254 apresentou poder calorífico com diferença superior a 6% quando comparada a TPC 350, sendo que o material perdeu por volta de 316 Kcal/kg. O Índice de Valor Combustível (IVC) leva em consideração o teor de umidade, densidade, poder calorífico e teor de cinzas, sendo assim, considera-se o melhor estimador para comparação do aproveitamento do combustível na geração de energia, pois leva em conta todos os parâmetros. O IVC foi maior quando a biomassa permaneceu menos tempo no campo (TPC 254), ocorrendo uma variação de 66% no IVC em relação ao teor de cinzas 550°C e 63% no TC 950°C. Soares (2016) pesquisando o cavaco de Eucalipto com casca encontrou valores de IVC próximos ao encontrado na TPC 254, com um valor de 114,6. Foi possível constatar que todos os aspectos analisados foram prejudicados pelo tempo de estocagem mais longo do coproduto no campo.

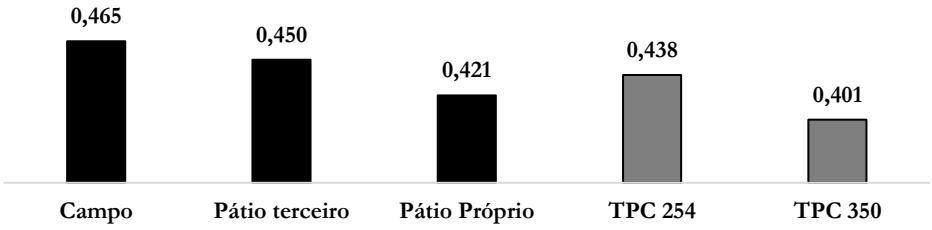
Tabela 4.1. Valores de Teor de Umidade %, Densidade Básica (g/cm³), Teor de Cinzas (%) e Poder Calorífico Superior, Inferior, Útil (Kcal/kg) e Índice de Valor Combustível (IVC).

TPC (dias)	U (%)	DB (g/cm³)	TC 550 °C (%)	TC 950 °C (%)	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	PCU (kcal/kg)	IVC (TC 550 °C)	IVC (TC 950 °C)
254	17	0,4376	0,5255	0,4435	4.942,60	4.618,60	3.708,21	101,30	120,03
350	22	0,4013	1,0165	0,795	4.626,67	4.302,67	3.241,05	34,74	44,42

Fonte. Autor. TPC: Tempo de Permanência no Campo. U: Teor de Umidade. DB: Densidade Básica. TC: Teor de Cinzas. PCS: Poder Calorífico Superior. PCI: Poder Calorífico Inferior. PCU: Poder Calorífico Útil.

Em relação a densidade básica em diferentes TPC, ao comparar com os resultados de densidade do capítulo 2, percebe-se que o cavaco processado no campo ao permanecer 350 dias estocado, perde por volta de 13% da sua densidade e enquanto na TPC de 254 há uma redução de 6% em sua densidade básica. Para evitar grandes perdas não seria recomendado estocar o coproduto por muito tempo no campo ou guardá-los ao ar livre, pois estará exposto aos intemperes do clima.

Figura 4.3. Comparação entre as densidades básicas (g/cm³) do capítulo 2 com as analisadas em duas diferentes TPC's do presente capítulo.



Fonte. Autor.

4.4.2 Volume de madeira para celulose e para energia (coproduto) e potencial energético/econômico

Para a presente análise foram utilizados dados do talhão BMIG8A, que possui uma área de 42,1 hectares, 972 árvores/hectare de *Eucalyptus grandis* de 7 anos, com espaçamento de 9 m² (3m x 3m). Foram medidos 10 coprodutos, em 4 classes de diâmetro para determinar o volume de biomassa que seria destinada para a energia (coproduto), em relação ao cavaco direcionado para a produção de celulose. Procurou-se analisar o volume (m³) destinado à fabricação de celulose e para geração de energia se fossem aumentados ou diminuídos em 5, 10 e 15 cm, como mostra a Figura 4.1.

A partir dos dados coletados, chegou-se as médias referentes aos parâmetros dos coprodutos (Tabela 4.2.). É importante salientar que a empresa Klabin utiliza o diâmetro de 8 cm como base para determinação do corte da seção para separar a madeira direcionada a celulose do coproduto, sendo assim, o valor médio coletado foi 17% maior que o valor determinado pela empresa. Para comparar o montante produzido de matéria-prima destinado para energia ou para celulose, optou-se por estimar os valores do volume onde o coproduto fosse aumentado ou diminuído em relação ao d1, nas alturas 5, 10 e 15 cm do coproduto, como mostra a Figura 4.1. Os diâmetros d2 est., d3 est. e d4 est., foram estimados utilizando a equação 11, onde podem ser vistos os resultados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Dados referentes ao diâmetro média real das seções (preto: d1, d2, d3, d4, d5, d6), os diâmetros médios estimados no aumento do coproduto (d2 est., d3 est e d4 est.), altura (H) e o volume médio individual.

Diâmetros	d4 est. (cm)	d3 est. (cm)	d2 est. (cm)	d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)	d4 (cm)	d5 (cm)	d6 (cm)	H (m)	Vol (m³)
Cop. Média	10,9	10,7	10,5	9,6	8,8	8,6	8,5	5,9	1,4	9,1	0,028

Fonte. Autor.

Considerando a média do volume dos coprodutos analisados, chegou-se a um valor de 26,92 m³ por hectare e para a área total de 1.133,46 m³. Multiplicando pelos valores de densidade básica nas duas TPC's, tem-se 496 toneladas para 254 dias e 455 toneladas para 350 dias de estocagem no campo, diferença de 8,3% entre os cavacos. Utilizando como base os dados da tabela 4.3 e 4.4, aplicando o cálculo de energia disponível do Atlas da Bioenergia do Estado de São Paulo e considerando que 1 joule equivale a 0,0002389 Kcal ou 2,7778 x 10^{-10} MWh, constatou-se que para a TPC 254 seriam gerados 799 MWh, e para a TPC 350 poderiam ser gerados 682 MWh com o mesmo volume de coproduto, onde há uma perda de 14% no potencial energético.

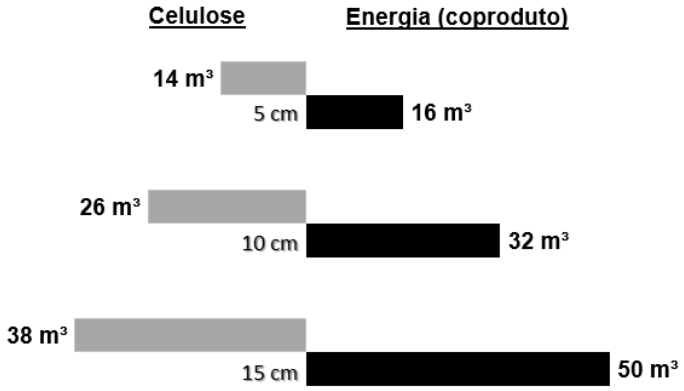
Tabela 4.3. Volume, Densidade Básica e Densidade Energética do coproduto de 42,1 hectares.

Amostra	Coproduto (m³)	DB (kg/m³)	Coproduto (Kg)	Coproduto (Ton.)	DE* (Gcal/m³)	DE* (Gcal/ton)	DE Total* (Gcal)
TPC 254	1.133,46	437,6	496.002	496	1,62	3,708	1.839,28
TPC 350	1.133,46	401,3	454.857	455	1,30	3,241	1.474,22

Fonte. Autor. DB: Densidade Básica. DE: Densidade Energética. *Densidade energética base Poder Calorífico Útil.

Ao aumentar em 5, 10 e 15 cm o tamanho do coproduto para a área de 42,1 ha, seriam disponibilizados a mais para a energia 16, 32 ou 50 m³ de madeira e ao diminuir o coproduto seriam acrescidos a celulose 14, 26 e 38 m³, respectivamente, como mostra a Figura 4.4. Sendo assim, a diferença na proporção do volume para energia seria de 13, 19 e 24% (5, 10 e 15 cm) maior que o montante destinado para celulose, isso é devido a conicidade da árvore. Aumentando a proporção volumétrica para celulose, a quantidade de resíduos indesejados será mais elevada na matéria-prima, pois perto do topo da árvore há uma incidência maior de galhos finos e casca.

Figura 4.4. Diferença no aumento ou na diminuição do coproduto em 5, 10 e 15 cm destinado à energia (aumento do tamanho do coproduto) e na fabricação de celulose (diminuição do tamanho do coproduto) para o talhão BMIG8A, com 42,1 hectares.



Fonte. Autor.

Na Tabela 4.4 é possível encontrar valores referentes ao preço da celulose no mercado interno e externo, bem como o preço da tonelada de cavaco para a celulose e para energia. Estes valores serviram de referência para os cálculos de rendimento do montante estimado para celulose e para energia, ajudando na comparação de valores entre os dois mercados.

Tabela 4.4. Preços de mercado de alguns produtos florestais.

	Preço
Celulose (mercado interno)	R$ 2.166/ton
Celulose (mercado externo)	USD$ 636/ton
Cavaco celulose	R$ 300/ton[11]
Cavaco energia	R$ 41,82/m³

Fonte. BACCI et al. (2021), MOREIRA et al. (2019).

Utilizando a estimativa sugerida por Freitas (2013) onde considera-se que para a fabricação de 1 tonelada de celulose, em média, necessita-se de 1,876 toneladas de madeira de Eucalipto seca e peneirada ou 3,75 m³. Para a diminuição de 5 cm no coproduto, seriam direcionados 14 m³ de matéria-prima para celulose, considerando em média 15% de casca e resíduos (retirados no peneiramento), sendo assim, o montante de cavaco limpo seria de 12 m³ para a fabricação de celulose, onde poder-se-iam produzir 3,2 toneladas, com valor no mercado interno de R$ 6.931,20 ou venda para o externo de USD$ 2.035,20. Para a diminuição em 10 cm seriam direcionados para celulose 26 m³, considerando 15% de casca e resíduos, aproximadamente 22 m³ de cavaco limpo para a fabricação de celulose (5,8 tons de celulose), sendo assim, no mercado interno este montante pode chegar ao valor de R$ 12.707,20 e no externo de USD$ 3.731,20. Para 15 cm a produtividade foi de 38 m³, sendo descontado 15% da casca e resíduos, chega-se a um montante de 32 m³ de cavaco limpo, onde os valores estimados para o mercado interno e externo são de R$ 18.483,20 e USD$ 11.755, respectivamente.

[11] https://www.mfrural.com.br/

Na tabela 4.3. encontram-se os preços da comercialização de energia no Brasil, sendo a portaria nº 65, de 27 de fevereiro de 2018 responsável por estipular valores anuais de referência específicos (VRES). Estes serão utilizados como parâmetro de comparação em relação ao valor econômico gerado, no caso da energia.

Tabela 4.5. Valores Anuais de Referência Específicos (VRES), de acordo com portaria nº 65, de 27 de fevereiro de 2018, Ministério de Minas e Energia.

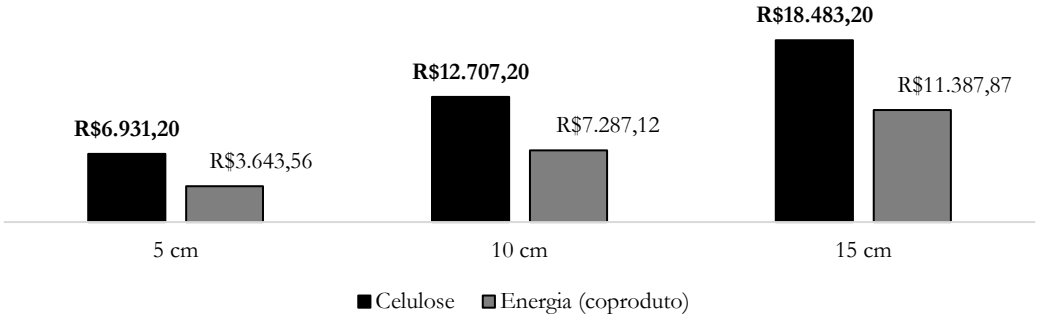
Fonte	Preço
Biogás	R$ 390,00/MWh
Biomassa Dedicada	R$ 537,00/MWh
Biomassa Residual	R$ 349,00/MWh
Cogeração a Gás Natural	R$ 451,00/MWh
Eólica	R$ 296,00/MWh
PCH / CGH	R$ 360,00/MWh
Resíduos Sólidos Urbanos	R$ 561,00/MWh
Solar Fotovoltaica	R$ 446,00/MWh

Fonte.: (MME, 2018)

Aplicando a estimativas utilizadas nos cálculos anteriores para energia, ou seja, aumentar o tamanho do coproduto, não é necessário nesta etapa a retirada dos 15% de resíduos, pois o material como um todo segue para a caldeira. Para o aumento do tamanho do coproduto em 5 cm, tem-se 16 m³ de volume de madeira, sendo assim R$ 664,32 de cavaco que poderiam ser comercializados para a geração de energia (Tabela 4.3). Utilizando como base os cálculos do Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO et al., 2020), aplicando valores de densidade básica (média: 0,4195 g/cm³) e poder calorífico (média: 4.460,64 kg/kcal) de amostras de coproduto, o mesmo montante poderia gerar 10,44 MWh e ser comercializados por R$ 3.643,56. Para o aumento do coproduto em 10 cm, gerou-se 32 m³, onde poderiam ser comercializados por R$ 1.338,24 ou gerado 20,88 MWh, se essa energia fosse comercializada poderia gerar de receita R$ 7.287,12. Por fim, para o aumento de 15 cm do coproduto, obteve-se 50 m³ de madeira de Eucalipto, onde poderia ser vendido pelo preço de R$ 2.091,00, ou poderiam ser gerados 32,63 MWh, ou R$ 11.387,87.

Ao se comparar a venda de celulose e de energia, em relação ao aumento e a diminuição do coproduto, percebe-se que sempre a venda da celulose gerará mais receita que a venda de energia, o que resta saber e quanto custa para a empresa a fabricação de determinado volume de celulose e no caso do cavaco, o custo de produção. A diferença na receita celulose x energia entre os tamanhos 5, 10 e 15 cm é de 47%, 42% e 39%, respectivamente, tornando a celulose muito mais rentável. Outros parâmetros devem ser colocados em conta, pelo fato de que a empresa em foco compra cavaco de terceiros para geração de energia, neste caso o custo seria eliminado. Outro importante fator é que a empresa produzirá energia suficiente para sua linha de produção, diminuindo o custo com compra de energia e possibilitando a comercialização excedente produzido, por valores maiores do que os contidos na Tabela 4.5.

Figura 4.5. Comparação entre rentabilidade dependendo do aumento (celulose) ou diminuição (energia) do tamanho do coproduto para uma área de 42,1 hectares de *Eucalyptus grandis*.



Fonte. Autor.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS – CAPÍTULO 4

De acordo com os dados do capítulo, o longo tempo de permanência no campo (TPC) do coproduto prejudicou os parâmetros físicos e químicos da biomassa, sendo que a maior diferença foi no teor de cinzas, seguidos por teor de umidade, densidade e poder calorífico. Comparando o tamanho do coproduto em relação à produção de celulose e energia, a celulose apresentou maior rentabilidade bruta em comparação com a energia, onde estudos mais detalhados de custos de produção devem ser realizados.

O teor de umidade do coproduto foi 23% maior na TPC 350 que na TPC 254, a densidade básica (g/cm³) da TPC 240 foi 8% maior que na TPC 350. O teor de cinza (%) foi o que obteve maior diferença onde na temperatura 500°C e 950°C foram 44% e 48% maiores na TPC 350. O poder calorífico é 6% maior na TPC 254 que na 350, sendo que o material perde por volta de 316 Kcal/kg. O IVC foi maior quando a biomassa permaneceu menos tempo no campo (TPC 254), ocorreu uma variação de 66% em relação ao teor de cinzas 550°C e 63% no TC 950°C. Com relação à diferença na proporção do volume para energia, esta foi de 13, 19 e 24% (5, 10 e 15 cm) maior que o montante destinado para celulose, devido à conicidade da árvore. A diferença na receita bruta da celulose foi maior em comparação com a geração de energia entre os tamanhos 5, 10 e 15 cm onde a diferença foi de 47%, 42% e 39%, respectivamente.

REFERÊNCIAS

ARCE, J. E. **Pesquisa Operacional Para Fins Florestais**. Curitiba, PR: UNICENTRO, 2007.

BACCI, M. et al. **Resultados 2T21**. São Paulo, SP: Suzano Papel e Celulose, 2021. Disponível em: <https://s1.q4cdn.com/987436133/files/doc_downloads/2021/08/2T21/Release-de-Resultados_2T21_PT_vFinal.pdf>.

BRITO, J. O. **Expressão da produção florestal em unidades energéticas**. 1 Congresso Florestal Panamericano. **Anais**...: 3.São Paulo, SP, Brasil: 7 Congresso Florestal Brasileiro, 1993

COELHO, S. T. et al. **ATLAS de BIOENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO**. São Paulo, SP, Brasil: Instituto de Energia e Ambiente - IEE, 2020.

FIGUEIREDO, E. O. .; SCHROEDER, R. .; PAPA, D. A. . **Comunicado Técnico 173: Fatores de forma para 20 Espécies Florestais Comerciais da Amazônia**: 173. Rio Branco, AC: EMBRAPA, 2009. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAF-AC-2010/23018/1/cot173.pdf>.

FOELKEL, C. E. B. O Processo de Impregnação dos Cavacos de Madeira de Eucalipto pelo Licor Kraft de

Cozimento. In: **Eucalyptus Online Book e Newsletter**. Brasil: Associação Brasileira Témica de Celulose e Papel - ABTCP, 2009. p. 2–97.

FREITAS, R. C. O. **Quantidade de madeira de eucalipto para produção de uma tonelada de celulose branqueada**. Vitória, ES, Brasil: Eucalyptus Online Book and Newsletter, 2013. Disponível em: <https://www.eucalyptus.com.br/eucaexpert/1071_Quantidade madeira para fabricar celulose.pdf>.

GRAÇA, M. E. C.; TAVARES, F. R. CAPACIDADE DE REBROTA E DE ENRAIZAMENTO DE Eucalyptus benthamii. In: Colombo, PR: Boletim de Pesquisa Florestal, 1999. p. 135–138.

LI, C. et al. Drought responses of Eucalyptus microtheca provenances depend on seasonality of rainfall in their place of origin. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 27, n. 3, p. 231–238, 2000.

MME. **Diário oficial da união - Portaria N 65, de 27 de Fevereiro de 2018**BrasilMinistério de Minas e Energia, , 2018. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/4716350/do1-2018-02-28-portaria-n-65-de-27-de-fevereiro-de-2018-4716346>

MOREIRA, J. M. M. Á. P. et al. Análise de viabilidade econômica da produção de eucalipto para energia em Rio Verde, GO. **Embrapa**, n. 1980–3958, p. 1–30, 2019.

PEREIRA, J. C. D. et al. **Características da Madeira de Algumas Espécies de Eucalito plantadas no BrasilEmbrapa Florestas**. Colombo, PR, Brasil: Embrapa Florestas, 2000. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/297469/1/doc38.pdf>.

SOARES, J. M. **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE TRÊS DIFERENTES TIPOS DE CAVACOS DE MADEIRA DO HÍBRIDO Eucalyptus urophila x grandis**. Curitiba, PR, Brasil: Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2016.

5. CONCLUSÃO GERAL, LIMITAÇÕES DO ESTUDO E PRÓXIMOS PASSOS

5.1 CONCLUSÃO GERAL

Com a aplicação de novas tecnologias no setor florestal, promovendo um aumento significativo na eficiência energética, é possível vislumbrar um futuro voltado a fontes renováveis em substituição aos combustíveis fósseis. A questão central é que não existe um sistema de geração de energia ou um combustível melhor que outro e sim o mais adequado para cada microrregião, ou a combinação de fontes renováveis, como é o caso das "*smartgrids*". A presente tese procurou entender a dinâmica e as características do cavaco de madeira na geração de energia dentro de uma empresa do setor florestal paranaense (Klabin), onde o combustível é basicamente proveniente de resíduos florestais e uma pequena parcela das áreas são dedicadas (árvore inteira).

As conclusões específicas dos experimentos realizados na presente tese foram:

- O cavaco do campo, do pátio próprio e do pátio de terceiros apresentaram diferença estatística significativa. O cavaco do campo apresentou 6% a mais de umidade que o cavaco próprio e 11% maior que o cavaco comprado de terceiros. Com relação à posição do cavaco na pilha, o topo apresentou o menor teor de umidade, cerca de 7% menor que o meio e 5% menor que na base da pilha;

- Houve diferença estatística entre as densidades do cavaco do campo, do pátio próprio e do pátio de terceiros. Sendo que as maiores densidades estão no campo, onde comparando-o com a densidade do cavaco de terceiros, há uma diferença de 9,5%. Os cavacos de maiores densidades concentraram-se em sua maioria no topo da pilha, 2,8% maior que no meio e 0,5% maior que na base da pilha;

- A granulometria do cavaco foi maior no campo que no pátio da empresa (próprio e terceiro) e os resíduos indesejados no cavaco do campo (finos de madeira, terra e casca) foram 17% menores que o cavaco estocado, ou seja, há uma quantidade de finos de madeira, terra e casca maior no pátio que no campo;

- Os cavacos com menores dimensões (finos: < 4mm) estão localizados em sua maioria no meio e na base da pilha, sendo 6% e 4% maior que no topo, respectivamente. Os cavacos de maiores dimensões (25mm) estão presentes no topo da pilha, sendo que a base da pilha possui 11% a menos deste tipo de cavaco. O cavaco do campo apresentou maiores quantidades de terra que os demais e o cavaco de terceiros a maior quantidade de casca;

- As cascas de Eucalipto acumuladas no campo ao chegar a fábrica podem causar danos aos equipamentos, justamente devido a sua alta resistência a tensão. Sugere-se que estes resíduos de casca sejam picados com um equipamento específico para que sejam utilizados na implementação de florestas, incorporando-o ao solo, devido ao seu alto teor de cálcio e magnésio;

- Dos quatro modelos matemáticos o que melhor se ajustou aos dados foi o não linear em potência (modelo número 4);

- O modelo 4 se ajustou bem aos dados, onde os parâmetros estatísticos apresentaram valores significativos (AIC: -501,4267 / $R^2_{ajust.}$: 0,8730 / Syx %: 0,0621 / P-valor: <0,01), enfatizado pela distribuição de resíduos;

- O modelo 4 pode ser aplicado para qualquer Tempo de Permanência no Campo (TPC), pois não apresentou diferença estatística entre os diâmetros da base e entre os volumes dos coprodutos nas TPC's 90, 150 e 320 dias;

- O modelo 4 estima o volume de madeira do coproduto em m³, sendo necessária a análise de densidade para que possa aferir a produção do local em toneladas de cavaco e o poder calorífico para o potencial energético;

- O teor de umidade do coproduto foi 23% maior na TPC 350;

- A densidade básica (g/cm³) da TPC 240 foi 8% maior que na TPC 350;

- O teor de cinza (%) na temperatura 500°C e 950°C são 44% e 48% maiores na TPC 350;

- O poder calorífico é 6% maior na TPC 254 que na 350, sendo que o material perde por volta de 316 Kcal/kg;

- O IVC foi maior quando a biomassa permaneceu menos tempo no campo (TPC 254), ocorreu uma variação de 66% no IVC em relação ao teor de cinzas 550°C e 63% no TC 950°C;

- A diferença na proporção do volume para energia foi de 13, 19 e 24% (5, 10 e 15 cm) maior que o montante destinado para celulose, devido à conicidade da árvore;

- A diferença na receita bruta da celulose foi maior em comparação com a geração de energia entre os tamanhos 5, 10 e 15 cm onde a diferença foi de 47%, 42% e 39%, respectivamente.

5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO E PRÓXIMOS PASSOS

Com montante de dados coletados foi possível entender a dinâmica e as propriedades do cavaco direcionado a cogeração de energia de uma empresa localizada no estado do Paraná, tornando possível uma aplicação das interpretações geradas para otimizar a produtividade da companhia. Dados mais detalhados de custo de produção, da energia comprada pela empresa e coletas abrangendo novas áreas, ajudarão a melhorar as estimativas matemáticas do processo, além de estudar mais profundamente o efeito do tempo de permanência no campo (TPC) com uma maior escala de tempo.

As análises de qualidade da biomassa direcionada a energia ajudará na preservação do sistema da caldeira no que diz respeito a quantidade de manutenções, este controle deve ser realizado principalmente no cavaco comprado de terceiros. A limitação em poder coletar uma maior gama de dados devido à pandemia de COVID-19 prejudicou o enriquecimento do conteúdo proposto, principalmente restringindo visitas externas na empresa, limitou-se também o uso da biblioteca e dos laboratórios por tempo indeterminado. Faz-se necessário uma maior interação dos laboratórios afins ao programa de bioenergia dentro da USP/ESALQ para melhor execução das análises referentes a tese, podendo ser incluído pela secretaria uma vaga para cada aluno aprovado direcionado aos laboratórios com a referente temática da tese.