

**DEBORA CRISTINA BIANCHINI**

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DO USO DE CAVACO  
DE MADEIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José Simioni  
Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Martha Andreia Brand

**LAGES, SC  
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Bianchini, Debora Cristina

Avaliação energética, econômica e ambiental do uso de cavaco  
de madeira para geração de energia térmica / Debora Cristina  
Bianchini. -- 2020.

91 p.

Orientador: Flávio José Simioni

Coorientadora: Martha Andreia Brand

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de  
Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, 2020.

1. Saldo energético. 2. Viabilidade Econômica. 3. Avaliação do  
Ciclo de Vida. I. Simioni, Flávio José. II. Brand, Martha Andreia.  
III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências  
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Ambientais. IV. Título.


**DEBORA CRISTINA BIANCHINI**

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DO USO DE CAVACO  
DE MADEIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.


**Banca examinadora:**

Orientador:

  
Prof. Dr. Flávio José Simioni

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV

Coorientadora:

  
Prof.ª Dr.ª Martha Andreia Brand

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV

Membros:

  
Prof. Dr. Valdeci José Costa

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV

  
Prof. Dr. Matheus Fontanelle Pereira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC



## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente àquele que sabe o propósito de tudo o que nos acontece, Deus, obrigada por sempre me guiar por caminhos de luz e evolução.

Agradeço aos meus pais, por todo apoio, amor, e incentivo, pois sem vocês eu não teria conquistado mais este título. Sabemos o quanto ele representa para nós, e saibam, que meu orgulho por vocês é infinito.

Agradeço à Universidade do Estado de Santa Catarina, a Fundação de Amparo à Pesquisa Inovação do Estado de Santa Catarina, e ao meu orientador, professor Flávio José Simioni, pela oportunidade de cursar o mestrado nesta renomada instituição, sendo bolsista, bem como, agradeço toda a paciência e dedicação que recebi durante o período de orientação.

Agradeço às amigas que fiz neste período aqui em Lages, especialmente à Letícia Andrea Chechi, à Laila Mayara Drebes, à Caroline Aparecida Matias e à Patrícia Müller, vocês contribuíram para que eu permanecesse na jornada, sabemos os desafios que a vida impôs neste período, e o quanto cada uma foi fundamental para enfrentá-los.

Agradeço, também, ao universo, por me proporcionar uma vida de oportunidades lindas, e por me causar situações adversas que contribuíram para a minha evolução como ser humano. Agradeço, pela vida que tenho!



“Renda-se, como eu me rendi. Mergulhe no que você não conhece como eu mergulhei. Não se preocupe em entender, viver ultrapassa qualquer entendimento.”

(Clarice Lispector)





## RESUMO

A biomassa florestal tem grande importância econômica no estado de Santa Catarina. Lages, caracteriza-se como um polo de indústrias madeireiras, o que fomenta o desenvolvimento de pesquisas sobre os resíduos de madeira industrial. A madeira residual é muito utilizada sob a forma de cavacos, porém, sofre alterações em sua qualidade conforme o seu teor de umidade, parâmetro capaz de diminuir ou aumentar o seu poder calorífico líquido. Sob esta perspectiva, adicionar um processo de secagem na biomassa por secador rotativo contribui para um aumento em sua capacidade energética. Assim, esta dissertação teve como objetivo analisar o uso de cavaco de madeira para geração de energia térmica sob a ótica energética, econômica e ambiental, considerando duas rotas tecnológicas, sendo estruturada em 3 capítulos correspondentes aos objetivos. O primeiro passo metodológico foi a definição das rotas do estudo, considerou-se como rota 1 aquela em que ocorre a utilização do cavaco de madeira com seu teor de umidade natural, de aproximadamente 55%. A rota 2 foi caracterizada como a utilização do cavaco de madeira após a etapa de secagem através de secador rotativo, com teor de umidade de aproximadamente 40%. Para todos os capítulos, considerou-se um banco de dados de análises realizadas por uma unidade de cogeração de Lages, e também, dados coletados em uma indústria local que realiza o processo de secagem do cavaco de madeira para fins de geração de energia térmica. No capítulo 2, em que foram realizadas análises sobre o conteúdo energético do cavaco e saldo energético de secagem, considerando diferentes teores de umidade e cinzas, foi obtido como resultados que o teor de umidade exerce forte influência sobre o poder calorífico líquido do cavaco de madeira, com uma relação inversamente proporcional. A adição da etapa de secagem no cavaco de madeira foi energeticamente compensatória em 70% das simulações, ou seja, a rota 2 foi energeticamente melhor em comparação a rota 1. Para o capítulo 3, no qual foi realizada a avaliação econômica e de risco da secagem industrial de cavaco de madeira, os resultados mostraram que o projeto de secagem de cavaco de madeira é economicamente viável, tendo um VPL de R\$ 5.726.223,68, TIR de 60,23%, *payback* descontado de 1,63 anos e Relação Benefício Custo de 1,39, com maior sensibilidade para o preço de venda do cavaco, assim, a rota 2 foi considerada economicamente realizável. Por último, o capítulo 4 foi correspondente a análise de impacto ambiental da diminuição do teor de umidade de cavaco de madeira em secador rotativo, realizada por meio de uma Avaliação do Ciclo de Vida, a qual permitiu evidenciar que, no geral, o cavaco úmido apresenta maior impacto ambiental quando comparado ao cavaco seco, no qual, o processo envolvendo a silvicultura e o transporte do cavaco foram os principais agentes relacionados aos impactos ambientais. Portanto, a realização deste trabalho permitiu concluir que a melhoria da qualidade do cavaco de madeira através de secador rotativo apresenta-se como uma atividade energeticamente positiva, economicamente viável e ambientalmente menos impactante. Esta dissertação corrobora para tomadas de decisões pautadas em melhores condições de utilização do cavaco para fins energéticos.

**Palavras chaves:** Saldo energético, Viabilidade Econômica, Avaliação do Ciclo de Vida.



## ABSTRACT

Forest biomass has great economic importance in the state of Santa Catarina. Lages, is characterized as a pole of wood industries, which fosters the development of research on industrial wood residues. The residual wood is widely used in the form of chips, but its quality changes according to its moisture content, a parameter capable of decreasing or increasing its liquid calorific power. From this perspective, adding a drying process to the biomass by rotary dryer contributes to an increase in its energy capacity. Thus, this dissertation aimed to analyze the use of wood chips to generate thermal energy from an energetic, economic and environmental perspective, considering two technological routes, being structured in 3 chapters corresponding to the objectives. The first methodological step was the definition of the study routes, considering as route 1 the one in which wood chips with their natural moisture content of approximately 55% are used. Route 2 was characterized as the use of wood chips after the drying stage by rotary dryer, with a moisture content of approximately 40%. For all chapters, a database of analyses performed by a Lages cogeneration unit was considered, as well as data collected in a local industry that performs the wood chips drying process for thermal energy generation purposes. In chapter 2, in which analyses were carried out on the energy content of the chips and the drying energy balance, considering different moisture and ash contents, it was obtained as results that the moisture content exerts a strong influence on the net calorific value of the wood chips, with an inversely proportional ratio. The addition of the drying stage on wood chips was energetically compensatory in 70% of the simulations, i.e. route 2 was energetically better compared to route 1. For chapter 3, in which the economic and risk evaluation of the industrial drying of wood chips was carried out, the results showed that the wood chips drying project is economically viable, with a net present value of R\$ 5. 726,223.68, IRR of 60.23%, discounted payback of 1.63 years and Benefit Ratio Cost of 1.39, with greater sensitivity to the sale price of the chips, thus, Route 2 was considered economically feasible. Finally, chapter 4 was corresponding to the environmental impact analysis of the decrease in the moisture content of wood chips in rotary dryers, carried out by means of a Life Cycle Assessment, which showed that, in general, wet chips have a higher environmental impact when compared to dry chips, in which the process involving forestry and chip transportation were the main agents related to environmental impacts. Therefore, the performance of this work allowed the conclusion that the improvement of wood chip quality through a rotary dryer presents itself as an energetically positive activity, economically viable and less environmentally impacting. This dissertation corroborates the decision making process based on better conditions for using wood chips for energy purposes.

**Keywords:** Energy Balance, Economic Viability, Life Cycle Assessment.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de representação das rotas tecnológicas de utilização do cavaco de madeira para geração de energia térmica. ....	30
Figura 2 - Mapa de localização da região do estudo. ....	31
Figura 3 - Esquema do processo de secagem do cavaco (rota 2). ....	33
Figura 4 - Cenários energéticos de consumo de combustíveis sólidos para a secagem de 1 t de cavaco com TU inicial de 55% e TU final de 40%. ....	34
Figura 5 - Variação do PCL do cavaco de madeira em função do aumento linear do TU, considerando diferentes níveis de TC (Simulação 1). ....	36
Figura 6 - Variação do PCL do cavaco de madeira em função do aumento linear de TC para diferentes níveis de TU (Simulação 2). ....	36
Figura 7 - Variação do PCL do cavaco de madeira com alterações simultâneas no TU e no TC (Simulação 3). ....	37
Figura 8 - Saldo de energia do processo de secagem do cavaco de madeira para três cenários de consumo energético. ....	38
Figura 9 - Saldo energético do processo de secagem industrial de cavaco de madeira sob diferentes combinações de TU de entrada e saída e Consumo Energético (CE). ....	39
Figura 10 - Escopo geral do empreendimento de secagem de cavaco, variáveis e cenários de avaliação do projeto. ....	51
Figura 11 - Sensibilidade do VPL em função de diferentes taxas de desconto. ....	59
Figura 12 - Taxa Interna de Retorno para diferentes níveis de preço de compra e venda de cavaco, para três cenários de consumo energético. ....	60
Figura 13 - Valor Presente Líquido para diferentes níveis de preço de compra e venda de cavaco, para três cenários de consumo energético. ....	61
Figura 14 - Sensibilidade da variação do VPL para as principais variáveis influenciadoras do projeto. ....	62
Figura 15 - Taxa interna de retorno da análise de risco do projeto para os três cenários energéticos. ....	63
Figura 16 - Valor presente Líquido da análise de risco do projeto para os três cenários energéticos. ....	64
Figura 17 - Rotas tecnológicas e fronteira do sistema do estudo de ACV do cavaco de madeira. ....	72
Figura 18 - Categorias de impacto ReCiPe midpoint e endpoint. ....	75
Figura 19 - Configuração de cálculo das interações entre os teores de umidade e os cenários energéticos. ....	77
Figura 20 - Impactos ambientais na categoria midpoint medidos em species.yr na geração de 1 MJ de energia térmica para três cenários energéticos. ....	78
Figura 21 - Impactos ambientais na categoria midpoint medidos em Daly para a geração de 1 MJ de energia térmica para três cenários energéticos. ....	80
Figura 22 - Impactos ambientais na categoria midpoint medidos em USD2013 na geração de 1 MJ de energia térmica para três cenários energéticos. ....	80
Figura 23 - Impacto ambiental em ponto final para a geração de 1 MJ de energia térmica considerando os três cenários energéticos. ....	82



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Investimento inicial do empreendimento para secagem de cavaco de madeira. ....	53
Tabela 2 - Componentes das despesas anuais. ....	53
Tabela 3 - Variações realizadas na análise de risco.....	57
Tabela 4 - Fluxo de caixa do empreendimento para secagem de cavaco de madeira CE-B. ...	58
Tabela 5 - Síntese dos principais indicadores econômico-financeiros para os três cenários de consumo energético. ....	59
Tabela 6 - Quantidades das entradas calculadas e inseridas nos datasets para a configuração de cálculo no SimaPro. ....	76





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ACV</b>	Avaliação do Ciclo de Vida
<b>CE</b>	Cenário Energético
<b>CE-A</b>	Cenário Energético A (maior consumo)
<b>CE-B</b>	Cenário Energético B (base)
<b>CE-C</b>	Cenário Energético C (menor consumo)
<b>EPE</b>	Empresa Brasileira de Pesquisa Energética
<b>IBÁ</b>	Indústria Brasileira de Árvores
<b>ICV</b>	Inventário do Ciclo de Vida
<b>PCL</b>	Poder Calorífico Líquido
<b>PCS</b>	Poder Calorífico Superior
<b>PIB</b>	Produto Interno Bruto
<b>T</b>	tonelada
<b>TC</b>	Teor de Cinzas
<b>TIR</b>	Taxa Interna de Retorno
<b>TU</b>	Teor de Umidade
<b>VPL</b>	Valor Presente Líquido
<b>VPLa</b>	Valor Presente Líquido Anualizado



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	21
1.1	OBJETIVOS .....	23
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	23
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	23
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
<b>2</b>	<b>SIMULAÇÃO DO GANHO E SALDO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE SECAGEM DE CAVACO DE MADEIRA COM DIFERENTES TEORES DE UMIDADE E CINZAS</b> .....	25
	RESUMO .....	25
	ABSTRACT.....	25
2.1	INTRODUÇÃO .....	26
2.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	29
2.2.1	<b>Definição das rotas tecnológicas do uso do cavaco</b> .....	29
2.2.2	<b>Local do estudo e origem dos dados</b> .....	30
2.2.3	<b>Poder Calorífico Líquido do cavaco</b> .....	32
2.2.4	<b>Saldo energético</b> .....	33
2.3	RESULTADOS.....	35
2.3.1	<b>Efeito do TU e TC sobre o PCL de cavaco de madeira</b> .....	35
2.3.2	<b>Avaliação energética do processo de secagem</b> .....	37
2.4	DISCUSSÃO .....	40
2.5	CONCLUSÃO .....	42
	REFERÊNCIAS .....	43
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÃO ECONÔMICA E DE RISCO DA SECAGEM INDUSTRIAL DE CAVACO DE MADEIRA</b> .....	47
	RESUMO .....	47
	ABSTRACT.....	47
3.1	INTRODUÇÃO .....	48
3.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	50
3.2.1	<b>Escopo e cenários estudados</b> .....	50
3.2.2	<b>Composição do fluxo de caixa</b> .....	52
3.2.3	<b>Análise econômico-financeira</b> .....	54
3.2.4	<b>Análise de sensibilidade</b> .....	56
3.2.5	<b>Análise de risco</b> .....	56
3.3	RESULTADOS.....	57
3.3.1	<b>Fluxo de caixa e os indicadores de viabilidade econômico financeira - Análise determinística</b> .....	57
3.3.2	<b>Análise de sensibilidade</b> .....	59
3.3.3	<b>Análise de risco</b> .....	62

3.4	DISCUSSÃO .....	64
3.5	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS .....	66
<b>4</b>	<b>IMPACTO AMBIENTAL DA DIMINUIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE CAVACO DE MADEIRA EM SECADOR ROTATIVO .....</b>	<b>69</b>
	RESUMO.....	69
	ABSTRACT .....	69
4.1	INTRODUÇÃO.....	70
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	72
<b>4.2.1</b>	<b>Definição das rotas tecnológicas, fronteira do sistema e cenários energéticos.....</b>	<b>72</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Local do estudo e coleta de dados.....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Avaliação do impacto do ciclo de vida .....</b>	<b>74</b>
4.3	RESULTADOS .....	77
<b>4.3.1</b>	<b>Impacto ambiental em ponto médio.....</b>	<b>78</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Impacto ambiental em ponto final para os três cenários energéticos de secagem...81</b>	<b>81</b>
4.4	DISCUSSÃO .....	83
4.5	CONCLUSÃO.....	85
	REFERÊNCIAS .....	85
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>88</b>
	REFERÊNCIAS .....	90

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A madeira tem seu uso como fonte de energia térmica marcado na história da sociedade, e continua sendo um importante combustível, principalmente nos países em desenvolvimento, todavia, seu uso tem aumentado bastante considerando as novas tecnologias de conversão de energia e a expansão da silvicultura (MIRANDA, 2015). Porém, apesar disso, o sistema de energia convencional ainda é dependente de combustíveis fósseis e energia nuclear (NISHIGUCHI; TABATA, 2016). Afere-se que, a mitigação dos impactos ambientais com o uso da biomassa, quando comparado aos combustíveis fósseis, é uma das vantagens da utilização de madeira para geração de energia, pois, é uma fonte energética menos impactante ao meio ambiente (SHABANI; AKHTARI; SOWLATI, 2013). Ainda, um maior aproveitamento da disponibilidade de resíduos de biomassa poderia reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> (NISHIGUCHI e TABATA, 2016).

Conforme informações apresentadas pelo Instituto Brasileiro de Árvores, em 2018, o Brasil fechou o ano com 7,83 milhões de hectares de florestas plantadas, destes, 1,6 milhões de hectares correspondem ao gênero *pinus*, sendo que 34% concentram-se no estado de Santa Catarina. Dentre os resíduos industriais, o cavaco, a serragem e o licor negro corresponderam a 9,72 milhões de toneladas, que foram destinados para a queima em caldeiras visando a geração de energia (IBÁ, 2019).

A região serrana de Santa Catarina tem como base a produção do gênero *pinus* (SIMIONI; BINOTTO; HOFF, 2012). Na região serrana, a cidade de Lages apresenta um complexo de indústrias florestais, sendo passível do desenvolvimento de uma economia circular<sup>1</sup>, o que contribuiria para um melhor aproveitamento da madeira (SILVA; SIMIONI; HOFF, 2020). Nesta perspectiva, Simioni et al. (2018) constataram que existe uma grande disponibilidade de coprodutos florestais, que são constituídos em sua maior parte por cavacos de madeira, sendo utilizados principalmente para a queima em caldeiras. Além disso, no Brasil, muitas das indústrias consumidoras de madeira possuem ou são dependentes de um sistema de secagem dela (ARAÚJO; MALINOVSKI e VASCONCELOS, 2011).

Incluir um processo de secagem da madeira antes de sua utilização resulta em melhorar a sua qualidade como combustível. De acordo com Laurila; Havimo; Lauhanen (2014) a melhoria da qualidade da biomassa tem interferência direta na sua capacidade de geração de energia, principalmente no que tange ao seu Teor de Umidade (TU). Brand et al. (2014)

---

<sup>1</sup> “A economia circular propõe que o valor dos recursos extraídos e produzidos seja mantido em circulação por meio de cadeias produtivas integradas” (SEHNEM; PEREIRA, 2019).

acrescenta que quanto maior o TU menor será o PCL, o que acaba influenciando negativamente nos custos de transporte devido a sua maior massa (ROUTA et al., 2016). Deste modo, os mesmos abordam que o TU pode ser controlado por meio de secagem natural ou industrial, a primeira, por sua vez, apresenta baixos custos de realização, porém, demanda longo tempo para o processo.

Um trabalho realizado na mesma região de estudo da presente pesquisa foi conduzido por Deboni et al. (2019), no qual, verificaram que em 2015, a usina de cogeração da região, adquiriu aproximadamente 250 mil t de cavacos de madeira. Análises deste material evidenciaram um TU médio de 55,27% e PCL de 1.699,96 kcal.kg<sup>-1</sup>. Adicionalmente, constataram que ao analisar o preço do cavaco conforme seu Poder Calorífico Líquido (PCL), quanto mais alto ele for, ou seja, quanto mais seco estiver o cavaco, maior será o seu valor. Como destacam Shabani, Akhtari e Sowlati (2013), novos estudos sobre biomassa deveriam considerar aspectos ambientais e sociais, além de questões econômicas, visto que, contribuiria para a solução de algumas questões pertinentes, como, emissões atmosféricas, políticas governamentais, uso da terra, dentre outros.

Alguns estudos foram realizados buscando relacionar, dentre outras, algumas variáveis energéticas, econômicas e ambientais, da utilização de biomassa de madeira, como: um estudo sobre a colheita florestal de biomassa em Michigan, analisando a eficiência energética, o custo econômico e as emissões de gases do efeito estufa (ZHANG et al., 2016); sobre energia térmica, impactos ambientais e econômicos de pellets de madeira na China, em substituição ao carvão mineral (WANG et al., 2017); sobre os impactos de uma cadeia de fornecimento de biomassa florestal para aquecimento, considerando principalmente as emissões de gases de efeito estufa, os custos financeiros e o potencial de empregos diretos (VALENTE; SPINELLI; HILLRING, 2011); sobre o desempenho ambiental, energético e econômico de uma cadeia de suprimento de biomassa de álamo na Espanha (SAN MIGUEL et al., 2015); sobre os efeitos do manejo florestal na rentabilidade econômica e a neutralidade de carbono da produção de biomassa florestal para bioenergia na Noruega (PYÖRÄLÄ et al., 2014); sobre avaliações econômicas e de risco das plantações de eucalipto no estado de Minas Gerais (PEREIRA et al., 2018).

Com base no exposto, percebeu-se que havia a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que viessem a contribuir com tomadas de decisão sobre o melhor uso do cavaco de madeira industrial na geração de energia térmica, considerando a correlação com o tripé da sustentabilidade<sup>2</sup> em seu escopo, e objetivando responder as seguintes questões de pesquisa: o

---

<sup>2</sup> Termo utilizado para designar os três pilares da sustentabilidade, social, econômico e ambiental (ELKINGTON, 2012).

balanço energético é positivo com a introdução da etapa de secagem do cavaco? É economicamente viável realizar a secagem da biomassa florestal para geração de energia térmica? A queima do cavaco seco para geração de energia térmica apresenta menor impacto ambiental quando comparado ao cavaco úmido? Assim, este trabalho justificasse por proporcionar a identificação de qual rota de utilização do cavaco para geração de energia térmica gera maior eficiência energética, maior lucratividade econômica e menor impacto ambiental. De modo geral, o resultado do estudo traz resposta a uma questão de pesquisa ainda não suficientemente estudada no Brasil, contribuindo para a melhor utilização dos recursos naturais e para a sustentabilidade.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar o uso de cavaco de madeira para geração de energia térmica sob a ótica energética, econômica e ambiental considerando duas rotas tecnológicas.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Analisar a eficiência e o balanço energético do uso do cavaco de madeira com diferentes teores de umidade para a geração de energia térmica.
- b) Analisar a viabilidade econômica da secagem do cavaco de madeira para uso energético.
- c) Verificar os impactos ambientais dos diferentes níveis de secagem do cavaco de madeira para uso energético.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além dessa introdução, esta dissertação foi estruturada em três capítulos, sendo que cada capítulo corresponde a um objetivo específico e foi apresentado em forma de artigo científico.

O capítulo 2 refere-se à “Simulação do ganho e balanço energético do processo de secagem de cavaco de madeira com diferentes teores de umidade e cinzas”. Nesse capítulo, é analisada a energia térmica gerada pelo cavaco de madeira com e sem o processo de secagem industrial através de secador rotativo, verificando se o balanço energético é positivo com a

adição da etapa de secagem do cavaco de madeira. Também foram realizadas simulações entre diferentes TU e Teor de Cinzas (TC) do cavaco, para percepção do comportamento energético do material conforme sua composição física. Nas análises, foram considerados três cenários de consumo energético para a secagem.

No capítulo 3 o trabalho aborda a “Avaliação econômica e de risco da secagem industrial de cavaco de madeira”. Nele, foram utilizadas ferramentas de análise econômico-financeira, análise de risco e de sensibilidade para avaliar a viabilidade de um projeto de secagem de cavaco de madeira. Adicionalmente, também foram considerados três cenários de consumo energético durante a secagem do cavaco.

O capítulo 4 trata do “Impacto ambiental da diminuição do TU de cavaco de madeira em secador rotativo”. Nesse, foram analisados os impactos ambientais relacionados a utilização de cavaco com alto TU, ou seja, sem o processo de secagem industrial, e também, com baixos TU, após o processo de secagem industrial através de secador rotativo. Para as análises utilizou-se a abordagem da ACV, onde foram analisados três cenários energéticos de secagem do cavaco e diferentes TU.

Por fim, é apresentada uma conclusão geral que descreve as principais contribuições e resultados que este estudo possibilitou em cada artigo, bem como, algumas sugestões de estudos que podem ser realizados.



## 2 SIMULAÇÃO DO GANHO E SALDO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE SECAGEM DE CAVACO DE MADEIRA COM DIFERENTES TEORES DE UMIDADE E CINZAS

**RESUMO:** A qualidade da biomassa florestal influencia diretamente na capacidade de geração de energia térmica. O Teor de Umidade (TU) é a propriedade física da madeira que tem a maior influência sobre a qualidade energética deste biocombustível, seguido do Teor de Cinzas (TC), dada a relação inversa destes parâmetros com o Poder Calorífico Líquido (PCL). Nesta perspectiva, o objetivo do presente trabalho foi analisar o PCL da utilização do cavaco de madeira como combustível com diferentes TU e TC, por meio de simulações de energia produzida. Também foi realizada a avaliação do saldo energético de um secador rotativo de cavaco de madeira para geração de energia térmica. Os dados foram obtidos em uma indústria que realiza a secagem de cavaco de madeira (industrial) com secador rotativo e complementados com dados secundários. Foram realizadas avaliações do PCL e saldo energético de duas rotas de utilização de cavaco de madeira (úmido e seco), compreendendo simulações com diferentes níveis de umidade e cinzas, e três cenários de gastos de energia para a secagem de cavaco de madeira. Como resultados, percebeu-se que o PCL do combustível sofre influência negativa com o aumento do TU, de 20% para 60%, variando de 3538 kcal.kg<sup>-1</sup> a 1469 kcal.kg<sup>-1</sup>, respectivamente, quando TC foi de 1%. O mesmo ocorreu quando o TC aumentou, de 1% para 20%, diminuindo o PCL de 3558 kcal.kg<sup>-1</sup> para 2836 kcal.kg<sup>-1</sup>, respectivamente, quando TU foi de 20%. Tais interações denotam que o TU exerce um poder maior, em comparação ao TC, sobre a variação energética do cavaco de madeira. O saldo energético apresentou-se energeticamente positivo em 84 das 120 interações realizadas, o que evidencia que o processo apresentado no estudo é energeticamente viável. O cavaco com 55% de TU apresentou PCL de 1.713.838,22 kcal.t<sup>-1</sup>, enquanto o cavaco seco, com TU de 40%, apresentou PCL de 2.485.117,62 kcal.t<sup>-1</sup>, obtendo-se um saldo de energia de 5.197,64 kcal.t<sup>-1</sup> no cenário base (CE-B). A energia líquida produzida pelo cavaco seco é maior do que a energia produzida pelo cavaco úmido, demonstrando que a secagem industrial é compensatória tanto para a indústria que a realiza, quanto para o consumidor final da biomassa.

**Palavras-chave:** Coproduto florestal, Secador Rotativo, Energia de Biomassa.

**ABSTRACT:** The quality of forest biomass directly influences the capacity to generate thermal energy. The Moisture Content (TU) is the physical property of wood that has the greatest influence on the energy quality of this biofuel, followed by the Ash Content (AC), given the inverse relationship of these parameters with the Net Calorific Power (LWP). In this perspective, the objective of the present work was to analyze the PCL of the use of wood chips as fuel with different TU and AC by means of simulations of the energy produced. It was also carried out the evaluation of the energy balance of a rotating wood chips dryer for thermal energy generation. The data were obtained from an industry that dries wood chips (industrial) with rotary dryer and complemented with secondary data. PCL and energy balance evaluations of two wood chip utilization routes (wet and dry) were performed, comprising simulations with different moisture and ash levels, and three energy expenditure scenarios for wood chip drying. As results, it was noticed that the fuel PCL suffers a negative influence with the increase of TU from 20% to 60%, varying from 3538 kcal.kg<sup>-1</sup> to 1469 kcal.kg<sup>-1</sup>, respectively, when AC was 1%. The same occurred when CT increased from 1% to 20%, decreasing PCL from 3558 kcal.kg<sup>-1</sup> to 2836 kcal.kg<sup>-1</sup>, respectively, when TU was 20%. Such interactions denote that the

TU exerts a greater power, compared to the AC, on the energetic variation of the wood chips. The energetic balance was energetically positive in 84 of the 120 interactions performed, which shows that the process presented in the study is energetically viable. The chip with 55% TU presented PCL of 1,713,838.22 kcal.t<sup>-1</sup>, while the dry chip, with 40% TU, presented PCL of 2,485,117.62 kcal.kg<sup>-1</sup>, obtaining an energy balance of 5,197.64 kcal.kg<sup>-1</sup> in the baseline scenario (EC-B). The net energy produced by dry chips is larger than that of wet chips, showing that industrial drying is compensatory both for the industry that produces it and for the final biomass consumer.

**Keywords:** Forest coproduct, Rotary Dryer, Biomass Energy.

## 2.1 INTRODUÇÃO

A biomassa florestal representa uma importante fonte de bioenergia, principalmente nos países que possuem grande disponibilidade de recursos florestais (ALAMIA; STRÖM; THUNMAN, 2015). O uso da biomassa florestal tem aumentado devido ao esgotamento dos combustíveis fósseis e questões relacionadas ao aquecimento global (MOHSENI et al., 2019). Neste sentido, os resíduos de madeira, produzidos na indústria de transformação mecânica são aproveitados, muitas vezes, pelas próprias empresas que os geram, para a geração de vapor em processos industriais (SIMIONI; HOEFLICH, 2011). Nas serrarias, por exemplo, são geradas quantidades significativas de resíduos de madeira que podem posteriormente serem utilizados como biocombustíveis sólidos (VASKOVIC et al., 2015).

No Brasil, a Política Nacional de Biocombustíveis, instituída pela lei Lei 13.576 de 2017, apresenta dentre suas finalidades, o incentivo e a regularização do uso dos biocombustíveis no país. Conforme o Plano Decenal de Expansão de Energia 2027, publicado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Energética – EPE (2018), a perspectiva do governo sobre a expansão da utilização da biomassa florestal por termelétricas é de 32%, especificamente sob a forma de cavaco de madeira. De acordo com Simioni et al. (2018) este é um mercado crescente e promissor, pois há empresas interessadas nos coprodutos da biomassa florestal, tais como o cavaco, a serragem, o pó e a maravalha.

A biomassa florestal sob a forma de lenha teve grande utilização como fonte energética durante a revolução industrial, depois, acabou perdendo espaço para o cavaco de madeira, tendo em vista o avanço tecnológico das caldeiras, a facilidade de manuseio e os benefícios energéticos relacionados à sua utilização (MIRANDA, 2015). Porém, a biomassa lenhosa precisa de pré-tratamento para reduzir o TU, o que melhora as propriedades do combustível, principalmente o PCL (MALEK et al., 2017). Ademais, o tratamento da biomassa proporciona

melhoria na qualidade do material, tornando a geração de energia mais eficiente (BRAND et al., 2014). Da mesma forma, Kuptz et al. (2019) demonstram que as etapas de processamento da biomassa (peneiramento e secagem) são adequadas para melhoria da qualidade do biocombustível. Nesse aspecto, uma das principais alternativas para melhorar a qualidade energética da biomassa são os tratamentos pós-colheita, como a secagem industrial, por exemplo (DA SILVA et al., 2017). A secagem da biomassa florestal é uma das alternativas de tratamento de suma importância para sua exploração na geração de energia térmica, pois, altos TU afetam negativamente a eficiência da geração em sistemas de gaseificação e combustão (GIUDICE et al., 2019).

Verma et al. (2017) apresentaram uma revisão sobre as diferentes tecnologias utilizadas para a secagem de biomassa e seus benefícios energéticos, onde constataram que a biomassa contém grande conteúdo de umidade e que, preferencialmente, deve ser seca antes de ser utilizada como combustível para aumentar a sua eficiência energética. Nesse contexto, Marques et al. (2018) apresentam que o fornecedor de biomassa pode obter uma melhoria de 20% em seu lucro, obtido com a variação do TU ao longo do tempo de armazenamento da biomassa em local protegido. De maneira análoga, Pecenka, Lenz e Idler (2018) compararam a qualidade de três tamanhos diferentes de cavacos de madeira ao longo de um período, sob um sistema de secagem natural, no qual perceberam que o cavaco pequeno é menos atrativo para a geração de energia visto que apresentou valores elevados de TU.

A redução do TU por meio da secagem da biomassa geralmente ocorre sob condições naturais, mas também podem ser utilizados sistemas artificiais para reduzir a umidade da madeira (MARQUES et al., 2018). Assim, uma das opções para a melhor otimização da biomassa visando seu uso energético é a integração dos secadores de biomassa florestal com outras plantas de processamento (STENSTRÖM, 2017). Alguns dos sistemas comumente utilizados para secagem de biomassa de madeira, incluem os secadores rotativos, de bandeja, de leito fixo, de bomba de calor, de transporte pneumático, de disco e de leito fluidizado (ARABI et al., 2017; VERMA et al., 2017). Nesse contexto, Giudice et al. (2019), enfatizam que mais pesquisas sobre o aumento da eficiência energética de secadores rotativos devem ser desenvolvidas, proporcionando uma maior recuperação de calor em usinas.

A necessidade de melhoria da qualidade da biomassa florestal para um maior aproveitamento como biocombustível, tem fomentado o desenvolvimento de pesquisas que buscam apresentar alternativas e metodologias que contribuam para a utilização máxima da energia que pode ser gerada com ela. Oveisi et al. (2018) realizaram a quantificação da variação nos parâmetros de qualidade da biomassa florestal, como TU, TC e tamanho das partículas,

buscando as causas das variações, o impacto no sistema e na produção de vapor. Dentre os resultados, verificaram que o TU foi o parâmetro que mais apresentou variação na biomassa, e também, que maiores TC interferem na diminuição do Poder Calorífico Superior (PCS) da biomassa florestal.

A biomassa florestal também pode ser utilizada em conjunto com outros resíduos, como pode ser observado no estudo de Korus e Szlek (2015), no qual infere-se que o TC apresenta impacto semelhante ao TU no valor de aquecimento do gás de síntese. Porém, para a situação proposta no estudo, perceberam que maiores níveis de TU foram benéficos para o sistema, aumentando sua eficiência, devido as menores taxas de fluxo de ar necessárias para manter as temperaturas de combustão e gaseificação adotados no experimento.

Recentemente, Mohseni et al. (2019) realizaram um estudo sobre a secagem da biomassa com experimentos em escala industrial, visando investigar a influência de alguns parâmetros, dentre eles o TU. No estudo, constataram que quanto maior for o TU de entrada da biomassa no secador, maior deverá ser o tempo de residência para a secagem dela, o que ocorre porque a biomassa que apresenta maior TU acaba sendo mais pesada e com isso demora mais a sair do sistema contendo baixos níveis de TU.

Kaplan e Celik (2018) avaliaram as características de secagem de aparas de madeira de dois tamanhos, onde perceberam a importância da secagem do material para aumentar a qualidade dos pellets produzidos. Similarmente, Arabi et al. (2017) apresentaram um estudo sobre as características de secagem das partículas de madeira de álamo, demonstrando que a temperatura, velocidade do ar de secagem e o TU apresentam efeitos sobre o tempo e taxa de secagem das partículas de madeira.

Tal qual, Campos, Rosa e Borga (2017) realizaram uma pesquisa sobre a quantificação da variação de gases em função do TU da biomassa, buscando identificar o TU ideal para uma maior eficiência energética e ambiental. No estudo, constataram que maiores TU contribuem para o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera durante o processo de combustão e, conseqüentemente, no aumento do TC. Ademais, destacaram que o estudo poderá contribuir para tomada de decisão estratégica e investimentos em tecnologias para o controle de queima ideal da biomassa.

Similarmente, Deboni et al. (2019a) analisaram a evolução da qualidade de resíduos florestais utilizados para a geração de energia em uma planta de cogeração, contemplando avaliações sobre o TU, TC e PCL da biomassa florestal. Os autores concluíram que ocorreu uma melhoria na qualidade do combustível e conseqüente aumento do PCL, quanto menor fosse o TU. Ainda, Deboni et al. (2019b) estabeleceram modelos que quantificam o impacto negativo

do TU e TC sobre o PCL de diferentes tipos de biomassa, demonstrando o efeito destes parâmetros sobre o valor (preço) da biomassa considerando sua capacidade energética.

Jesus et al. (2018) perceberam que a presença de água na madeira acabou afetando negativamente a energia total liberada, visto que houve uma maior demanda de calor para a decomposição térmica da madeira que continha maior TU. Os autores também sugerem que sejam considerados em trabalhos futuros o saldo de energia buscando a integração e otimização dos processos industriais, bem como, melhorar o rendimento e a qualidade dos produtos agregados.

Mediante o exposto, evidencia-se a importância de estudos que possibilitam o melhor aproveitamento da utilização da biomassa florestal para geração de energia térmica, contribuindo para uma maior eficiência energética do uso da biomassa florestal como biocombustível. Além disso, promovem a melhor utilização dos recursos naturais e menores impactos ambientais que possam estar atrelados ao uso da biomassa para energia. Assim, o objetivo do presente trabalho foi analisar o PCL da utilização do cavaco de madeira como combustível com diferentes TU e TC, por meio de simulações de energia produzida. Também foi realizada a avaliação do saldo energético de um secador rotativo de biomassa florestal visando a geração de energia.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

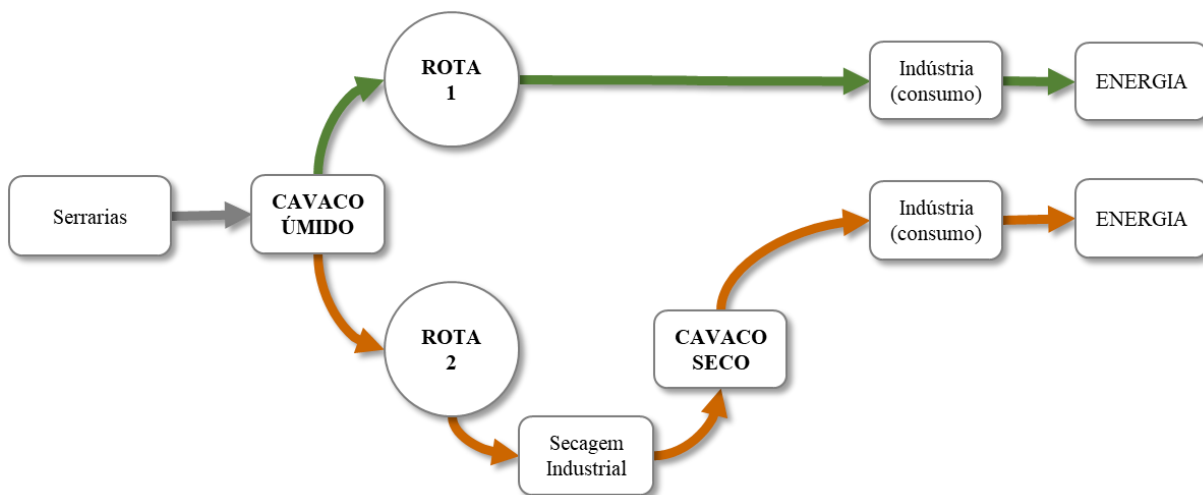
Os procedimentos metodológicos utilizados para a pesquisa estão apresentados em quatro subitens sequenciais. Inicialmente, apresenta-se a definição das rotas tecnológicas do uso do cavaco de madeira para energia e o escopo que compreende o estudo. O local do estudo é justificado na sequência, bem como a origem dos dados e informações quantitativas. Por fim, explica-se como foram realizadas as simulações e os cálculos de PCL e a determinação do saldo energético do processo de secagem do cavaco de madeira.

### 2.2.1 Definição das rotas tecnológicas do uso do cavaco

Definiu-se como rota tecnológica o fluxo de processos envolvidos na utilização do cavaco de madeira para geração de energia. Neste estudo, foram consideradas duas rotas tecnológicas (Figura 1), as quais compreendem o fluxo de cavaco úmido (rota 1) e o fluxo de cavaco seco em secador rotativo (rota 2), ambas destinadas à produção de energia térmica. As rotas tecnológicas de cavaco de madeira são comparadas entre si, analisando-se os componentes

energéticos envolvidos em cada uma, visando apontar qual delas é energeticamente mais eficiente. A comparação entre as duas rotas foi realizada considerando o conteúdo energético do cavaco representado pelo seu PCL, delimitado pela fronteira do estudo na Figura 1. Assim, não foi contemplada a sua utilização pela indústria, ou seja, o uso final pelo consumidor.

Figura 1 - Esquema de representação das rotas tecnológicas de utilização do cavaco de madeira para geração de energia térmica.



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

A rota 1 caracteriza-se pela utilização da biomassa florestal na forma de cavaco com TU sem prévia secagem, denominado neste trabalho como “cavaco úmido”, com um TU médio de 55,27% (DEBONI et al., 2019a). O cavaco, deste estudo, é um coproduto da indústria de manufatura da madeira (serrarias) de espécies do gênero *pinus*, e normalmente é utilizado em caldeiras industriais para geração de energia térmica, ou ainda, por termelétricas para geração de energia elétrica.

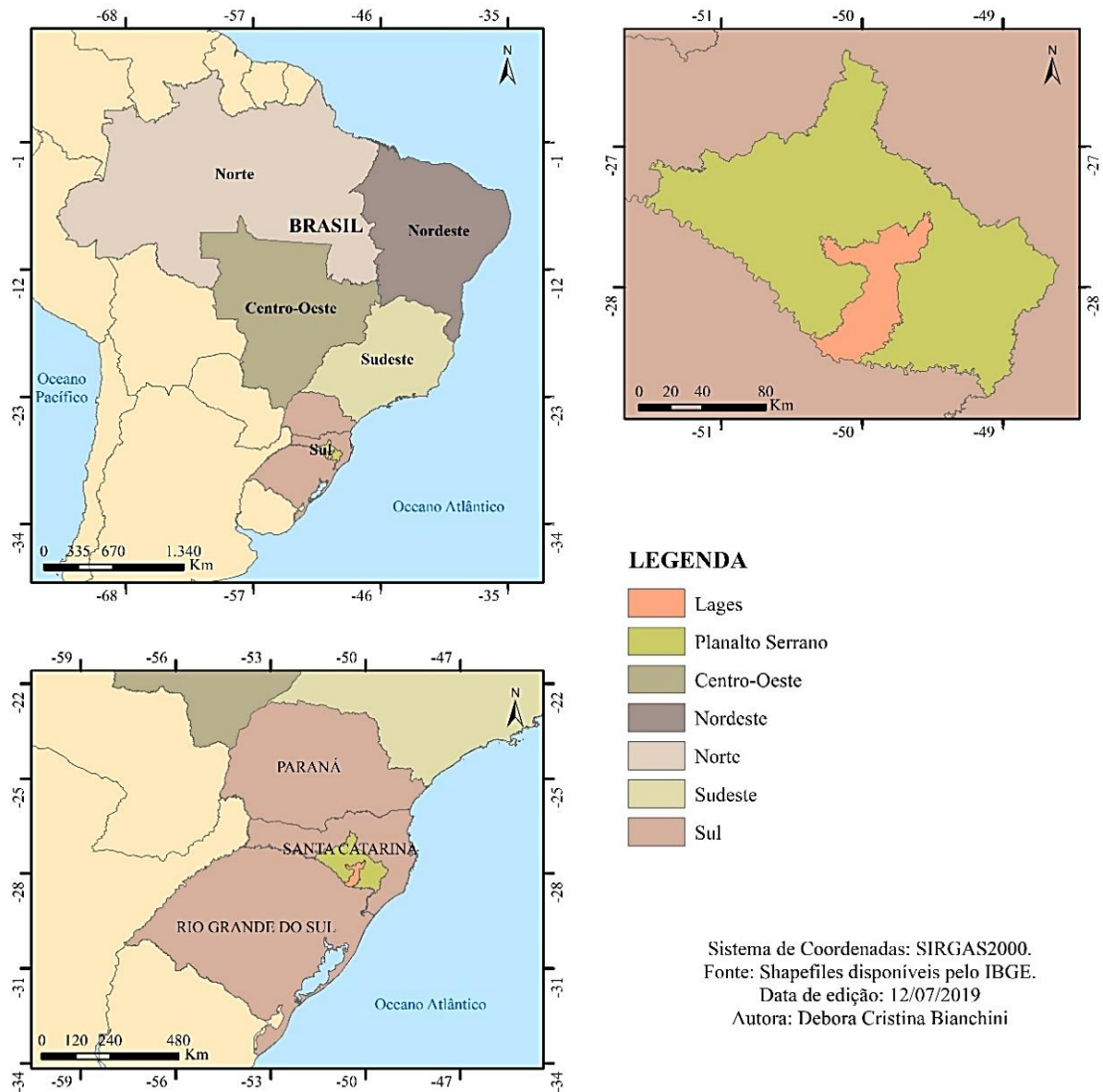
A rota 2 caracteriza-se pela utilização da biomassa florestal na forma de cavaco após a secagem industrial, denominado neste trabalho como “cavaco seco”. Nesta rota, o cavaco com TU médio de 55% passa por um secador rotativo, para redução do seu TU até 40% e, posteriormente, também é usado por indústrias para geração de energia térmica.

### 2.2.2 Local do estudo e origem dos dados

Os dados utilizados nesta pesquisa foram disponibilizados por uma empresa localizada no Planalto Serrano do estado de Santa Catarina (Figura 2), e serviram para a elaboração de um

cenário base de consumo energético do processo de secagem do cavaco de madeira. Esta empresa atua no ramo de tratamento da biomassa para geração de energia, sendo que uma das atividades é a secagem de cavacos de madeira com secador rotativo.

Figura 2 - Mapa de localização da região do estudo.



Fonte: Elaborada pela autora, 2019.

De acordo com o IBGE, em 2017, a produção total de toras de madeira no Brasil foi de 139.826,511 m<sup>3</sup>. Deste total, 64.508,920 m<sup>3</sup> foram produzidos na região Sul do país, ou seja, mais de 46% da produção nacional. Adicionalmente a isso, a indústria de base florestal representa um dos principais setores da economia do Planalto Sul Catarinense (FURTADO et al., 2012a), justificando a seleção deste local para a realização do estudo.

Os dados sobre os parâmetros de qualidade de TU e TC, utilizados para as simulações do PCL do cavaco de madeira foram provenientes de uma série histórica de 10 anos (de 2005 a 2015), disponibilizados por uma unidade de cogeração de energia situada em Lages/SC.

Para as simulações do saldo energético foram utilizados os dados quantitativos referentes aos combustíveis e energias consumidos durante o processo de secagem, que correspondem ao consumo de serragem para a secagem, com 107,33 t/mês, energia elétrica, com aproximadamente 24mil kWh, diesel, com aproximadamente 30 L/mês, e manutenção (10% sobre o consumo de diesel). Também foram coletados os dados referentes aos volumes de entrada (cavaco úmido) e saída (cavaco seco) dos últimos oito meses de operação da empresa, obtendo-se a média das entradas de cavaco úmido, que correspondem a 1.631,41 t/mês, e a média de saída de cavaco seco, que correspondem a 1.223,56 t/mês.

### 2.2.3 Poder Calorífico Líquido do cavaco

Para determinação do PCL, o primeiro passo foi a obtenção do poder calorífico inferior (PCI) - equação (1). De acordo com Brand (2010), a madeira apresenta aproximadamente 6% de hidrogênio, e para cada 1 kg de H<sub>2</sub>O a ser evaporado, são necessários aproximadamente 600 kcal de calor. Com base nestes parâmetros, tem-se a constante 324 como fator de redução do PCS (BRAND, 2010), para o cálculo do PCI.

$$PCI = PCS - 324 \quad (1)$$

Posteriormente, obteve-se o PCL equação (2), descontando-se além do TU, o TC do combustível, ambas estabelecidas por Lehtovaara (2004).

$$PCL (TU e TC) = PCI \times \left( \frac{(100-TC)}{100} \right) \times \left( \frac{(100-TU)}{100} \right) - 6 \times TU \quad (2)$$

Todos os cálculos foram executados para 3 simulações de variações entre TU e TC, com base em Deboni et al. (2019a):

*Simulação 1:* variações do TU entre 20% a 60%, para cinco níveis de TC (1%, 5%, 10%, 15% e 20%).

*Simulação 2:* variações do TC de 1% a 20%, para cinco níveis de TU (20%, 30%, 40%, 50% e 60%).

*Simulação 3:* variações simultâneas do TU de 20% a 60% e do TC de 1% a 40%.

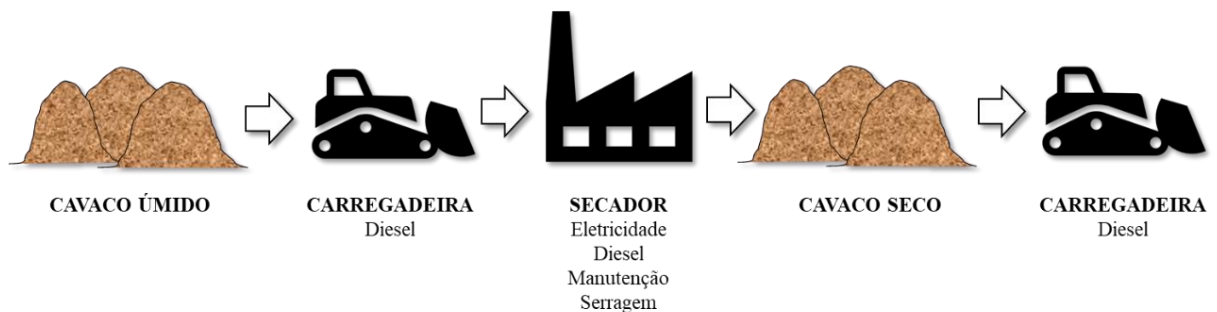


As simulações realizadas envolveram o TU na base úmida e o TC na base seca. Conforme Brand et al. (2014), o TU encontrado em seu estudo variou entre 15% e 59%, enquanto o TC variou entre 0,31% e 1,02%. O cavaco de madeira industrial possui valores médios de PCS ( $4.943 \text{ kcal.kg}^{-1}$ ), PCL ( $1.699,96 \text{ kcal.kg}^{-1}$ ), TU (55,27%) e TC (1,67%) (DEBONI et al., 2019a). O TC pode ser originado de maneira natural, por causa das substâncias inorgânicas que participam da nutrição do vegetal, ou por contaminação, em que há a adição de pedras, terra e areia que se agregam à biomassa (BRAND, 2010). Ambos os estudos aqui citados foram realizados na mesma região e com a mesma biomassa do presente estudo.

#### 2.2.4 Saldo energético

O saldo energético foi realizado pela comparação do PCL do cavaco de madeira considerando as duas rotas tecnológicas. Utilizou-se as médias dos parâmetros sobre TU, TC e PCL de cavaco de madeira e também os valores (em  $\text{kcal.t}^{-1}$ ) das energias consumidas para o processo de secagem industrial pelo secador rotativo. O consumo energético durante o processo de secagem de cavaco compreende a energia elétrica, o óleo combustível, a manutenção dos equipamentos e maquinários e a biomassa sob a forma de serragem, utilizados para o aquecimento do ar que passa pelo secador rotativo. O processo de secagem e utilização do cavaco (rota 2) pode ser observado pelo esquema apresentado na Figura 3. O cavaco de madeira industrial possui valores médios de PCL ( $1.699,96 \text{ kcal.kg}^{-1}$ ), TU (55,27%) e TC (1,67%), e a serragem apresenta um PCL médio de  $1519,96 \text{ kcal/kg}$  (DEBONI et al., 2019a).

Figura 3 - Esquema do processo de secagem do cavaco (rota 2).



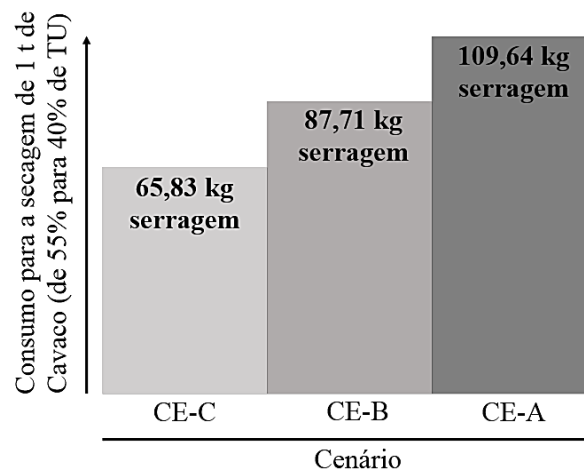
Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

A redução do TU do cavaco de madeira é realizada por um secador rotativo, no qual, o movimento da rotação somada a inclinação do secador faz com que o cavaco permaneça o

tempo necessário para que o TU seja reduzido de acordo com a necessidade da indústria consumidora. A fornalha do secador rotativo é alimentada com serragem, com o auxílio de uma carregadeira.

Foram propostos três cenários de consumo de combustíveis sólidos para a secagem de cavaco de madeira. A realidade vivenciada nessa empresa serviu para a elaboração do cenário base (CE-B) de consumo energético envolvido na secagem de cavacos. A partir do cenário base foi possível estabelecer um cenário de acréscimo de 25% no consumo energético, denominado como CE-A, e outro cenário de menor consumo energético, com um decréscimo de 25%, denominado CE-C, (Figura 4).

Figura 4 - Cenários energéticos de consumo de combustíveis sólidos para a secagem de 1 t de cavaco com TU inicial de 55% e TU final de 40%.



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

As simulações energéticas compreenderam diferentes níveis de TU de entrada e TU de saída de cavaco de madeira do processo de secagem, objetivando indicar qual a melhor combinação correspondente ao TU do material recebido e o material a ser entregue seco. Estabeleceu-se a faixa de simulações entre 65 e 51% de TU de entrada e 44 a 36% de TU de saída de cavaco de madeira do secador rotativo. As interações entre TU de entrada e TU de saída do cavaco representam uma redução de 15% do TU, que é a capacidade de diminuição do TU de um secador rotativo, conforme Brand e Giesel (2017).

De posse dos dados referentes a energia liberada pelo cavaco úmido, a energia consumida durante o processo de secagem de cavaco no secador rotativo e a energia liberada pelo cavaco seco, foi possível estabelecer a equação que representa o saldo energético proposto neste estudo. O saldo energético, equação (3), é a relação entre a diferença da energia gerada

pelo cavaco seco descontando-se dele o consumo energético para sua secagem (em kcal.t<sup>-1</sup>) e a energia gerada pelo cavado úmido (em kcal.t<sup>-1</sup>), podendo expressar assim se o saldo de energia é positivo ou negativo, ou seja, se é energeticamente viável realizar a secagem de cavaco de madeira em secador rotativo, conforme as condições que foram apresentadas neste estudo.

$$\text{Saldo Energético} = \text{energia}_{seco} - \text{energia}_{secagem} - \text{energia}_{úmido} \quad (3)$$

Onde:

*energia*<sub>seco</sub>: Energia disponível no cavaco seco (kcal.t<sup>-1</sup>).

*energia*<sub>secagem</sub>: Energia consumida no processo de secagem de cavaco (kcal.t<sup>-1</sup>).

*energia*<sub>úmido</sub>: Energia disponível no cavaco úmido (kcal.t<sup>-1</sup>).

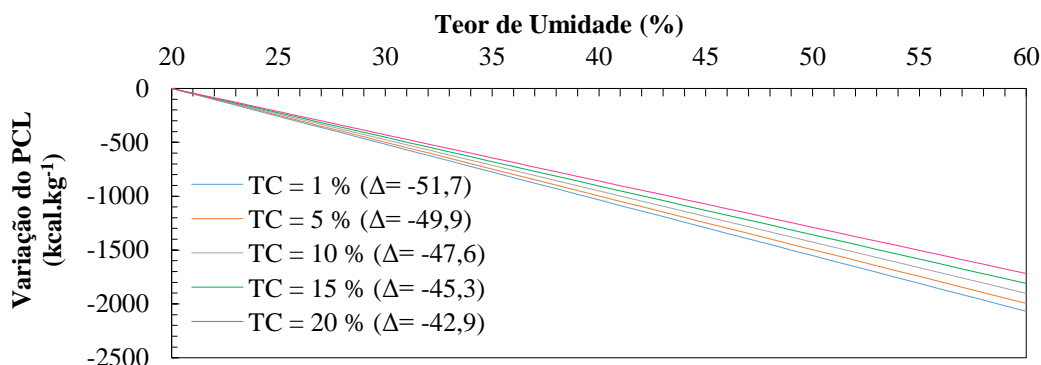
## 2.3 RESULTADOS

Os resultados estão apresentados em dois subitens, primeiro é apresentado o efeito do TU e TC sobre o PCL do cavaco de madeira, e posteriormente, a avaliação energética do processo de secagem do cavaco de madeira.

### 2.3.1 Efeito do TU e TC sobre o PCL de cavaco de madeira

A variação de energia produzida pelo cavaco de madeira em relação à diminuição do TU (de 20% a 60%), para diferentes níveis de TC (1%, 5%, 10%, 15% e 20%) é apresentada na Figura 5. Verifica-se uma diminuição linear do PCL conforme aumenta o TU. As variações ( $\Delta$ ) do PCL (kcal.kg<sup>-1</sup>) para cada 1% de aumento do TU foram de -51,7; - 49,9; -47,6; -45,3 e -42,9 kcal.kg<sup>-1</sup> para os níveis de TC de 1%, 5%, 10%, 15% e 20%, respectivamente. Nota-se, que a taxa de decréscimo é menos acentuada à medida que aumenta o nível de TC.

Figura 5 - Variação do PCL do cavaco de madeira em função do aumento linear do TU, considerando diferentes níveis de TC (Simulação 1).

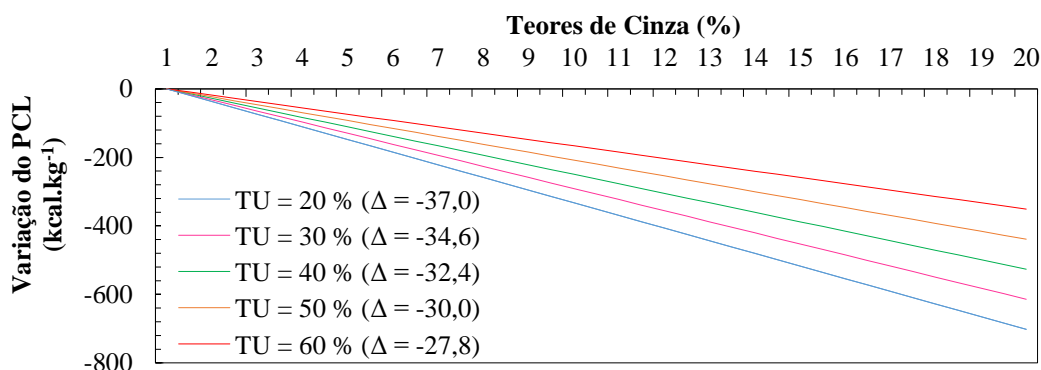


Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Nota: O  $\Delta$  representa a redução marginal do PCL para cada 1% de aumento do TU.

A Figura 6 apresenta a variação de energia produzida pelo cavaco de madeira em relação ao aumento do TC (de 1% a 20%), para diferentes níveis de TU (20%, 30%, 40%, 50% e 60%). Verifica-se uma diminuição linear na produção de energia conforme aumenta o TC. As variações ( $\Delta$ ) do PCL ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ ) para cada 1% de aumento do TC foram de -37,0; -34,6; -32,4; -30,0 e -27,8  $\text{kcal.kg}^{-1}$  para os níveis de TU de 20%, 30%, 40%, 50% e 60%, respectivamente. Nota-se, que a taxa de decréscimo é menos acentuada à medida que aumenta o nível de TU.

Figura 6 - Variação do PCL do cavaco de madeira em função do aumento linear de TC para diferentes níveis de TU (Simulação 2).



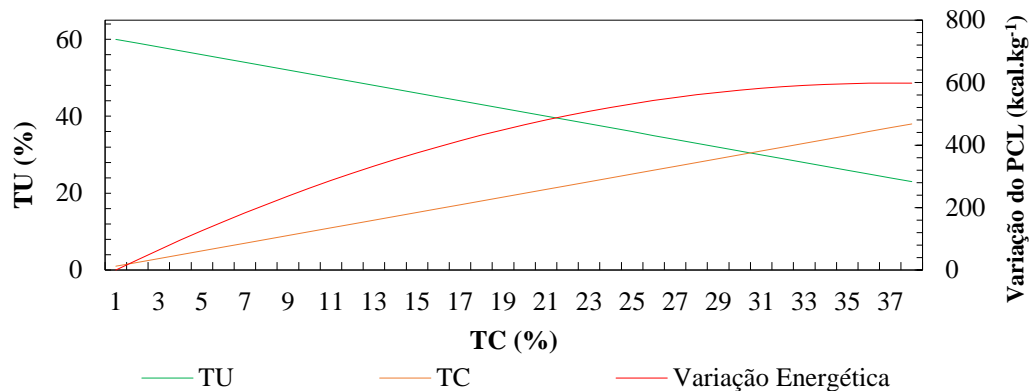
Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Nota: O  $\Delta$  representa a redução marginal do PCL para cada 1% de aumento do TC.

O efeito energético que a interação entre TU e TC exercem sobre o PCL do cavaco de madeira, ou seja, o efeito simultâneo pode ser visualizado na Figura 7. Nela, percebe-se que a diminuição gradual de 1% no TU resulta em um ganho energético maior do que a perda energética provocada pelo aumento gradual de 1% no TC, ou seja, há um ganho líquido

crecente. Constatase, que o TU apresenta uma influência maior no ganho energético, quando comparado a influência que o TC exerce sobre o ganho energético, porém, com uma variação marginal decrescente. Os resultados encontrados possibilitam interpretar que a melhor condição energética do cavaco de madeira está relacionada a TU menores que 40%.

Figura 7 - Variação do PCL do cavaco de madeira com alterações simultâneas no TU e no TC (Simulação 3).

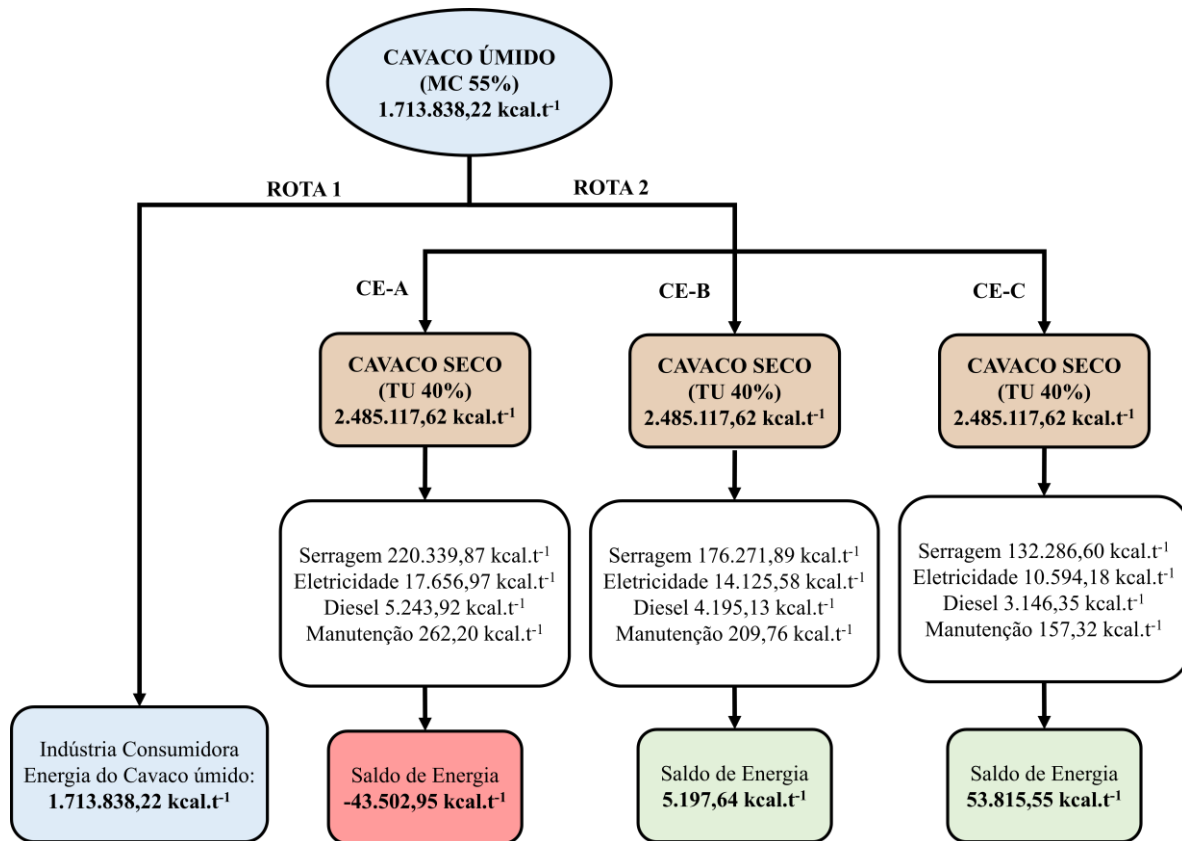


Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

### 2.3.2 Avaliação energética do processo de secagem

O cavaco seco (TU = 40%) após o processo de secagem industrial, apresentou valor energético superior ao cavaco úmido (TU = 55%),  $2.485.117,62 \text{ kcal.t}^{-1}$  e  $1.713.838,22 \text{ kcal.t}^{-1}$ , respectivamente. Porém, o saldo energético depende da quantidade de energia consumida durante a secagem do cavaco de madeira e também das combinações entre TU de entrada e saída do cavaco no secador. Assim, é importante que o tomador de decisão esteja atento aos combustíveis utilizados para a secagem do cavaco, bem como, aos níveis de redução de TU que o secador estiver programado a realizar. Na Figura 8 observa-se o fluxograma de energia do processo para os três cenários propostos de consumo de energia, expressos em  $\text{kcal.t}^{-1}$ .

Figura 8 - Saldo de energia do processo de secagem do cavaco de madeira para três cenários de consumo energético.



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Nota: Foram utilizadas as seguintes unidades de conversão: Serragem - 1519,96 kcal/kg (DEBONI et al., 2019a). Eletricidade - 1kWh = 860 kcal (BEN, 2003). Diesel 10.100 kcal/kg (ANP, 2019). Manutenção = 10% do diesel.

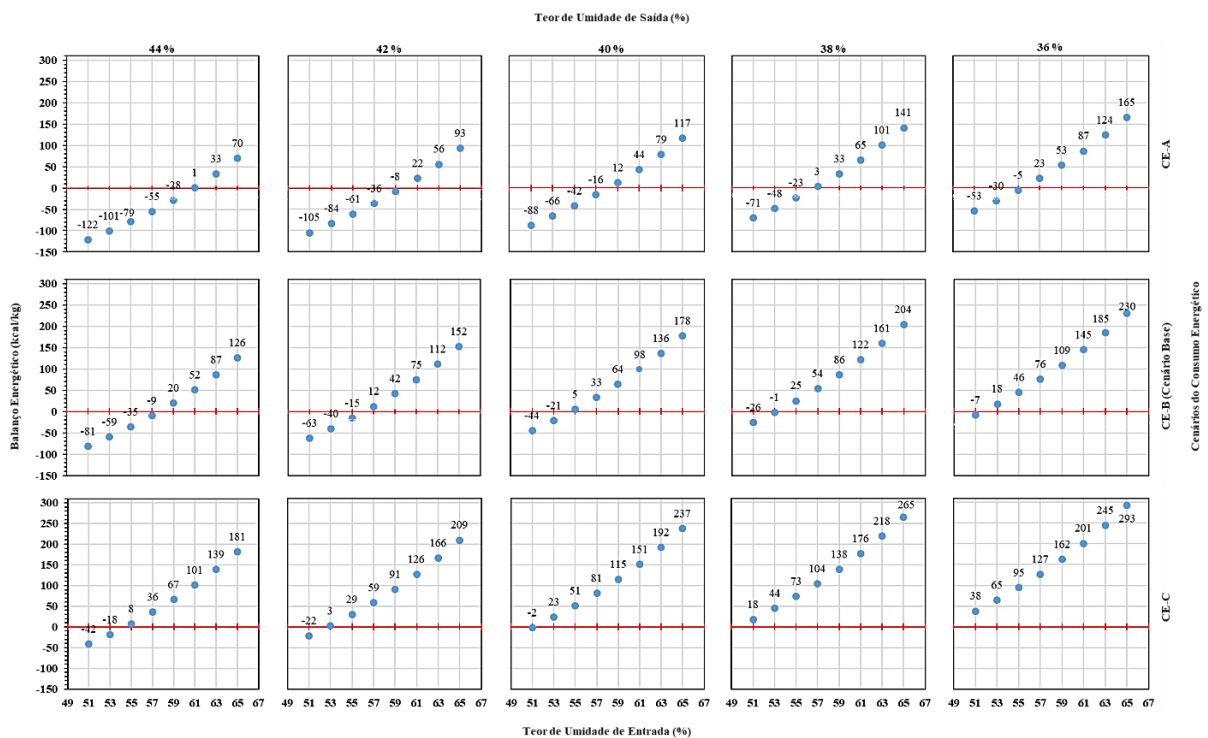
Pelo fluxograma de materiais expresso na Figura 8, percebe-se que o saldo de energia após o processo de secagem de cavaco de madeira, por meio do secador rotativo, alimentado por serragem, torna-se energeticamente compensatório a medida em que é consumida menor quantidade de biomassa (serragem) para a secagem. Os demais consumos energéticos representam uma pequena parcela ( $\approx 9,5\%$ ) do total de energia gasta com a secagem do cavaco, e correspondem a eletricidade utilizada pelos equipamentos, o diesel correspondente ao que é consumido pela carregadeira para a alimentação da fornalha e movimentação dos caminhões, e a manutenção das máquinas e veículos.

O maior consumo de energia se dá pela utilização da serragem, utilizada na fornalha do secador rotativo para produção de calor. Percebe-se, que quanto menor for a proporção de serragem consumida para a secagem do cavaco de madeira (CE-C), mais positivo será o saldo energético do processo de secagem industrial, visto que, o maior consumo de energia está concentrado no aquecimento do ar que passa pelo secador rotativo, que é alimentado pela

serragem. O CE-B apresentou um saldo de energia positivo, com  $5.197,64 \text{ kcal.t}^{-1}$ , já o CE-A, que é o cenário com o maior consumo energético para a secagem do cavaco, apresentou um saldo negativo entre a energia produzida pelo cavaco seco e a energia consumida durante a secagem, com  $-43.502,95 \text{ kcal.t}^{-1}$ .

A Figura 9 apresenta o impacto das variações do TU do cavaco de entrada (inicial) e de saída (final), considerando três cenários de consumo de energia para a realização da secagem. Pode-se constatar, que o saldo de energia aumenta na medida em que o TU de saída de cavaco de madeira do secador diminuiu. Por outro lado, para um mesmo TU de saída, o saldo energético é maior na medida em que aumenta o TU de entrada. Isso demonstra que quanto maior for a diferença entre o TU de entrada e o TU de saída, mais positivo será o saldo de energia.

Figura 9 - Saldo energético do processo de secagem industrial de cavaco de madeira sob diferentes combinações de TU de entrada e saída e Consumo Energético (CE).



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Considerando os três cenários propostos, percebe-se que de modo geral apenas 30% das 120 simulações do saldo energético apresentam resultados negativos. Do ponto de vista energético, o processo de secagem passa a apresentar valores positivos a partir de uma diferença de pelo menos 15% entre o TU de entrada e TU de saída de cavaco de madeira do secador rotativo. O cenário A é a pior situação de operação do sistema de secagem, com 50% das

simulações com resultado negativo. Nele, ocorre o maior consumo de combustíveis para a secagem de cavaco de madeira, cabendo assim ao tomador de decisão atentar-se aos níveis de TU do cavaco de madeira para que a secagem seja energeticamente viável. Porém, percebe-se que no cenário base (CE-B) ocorre um maior equilíbrio do saldo energético, sendo 70% das simulações energeticamente positivas. Sob as condições avaliadas neste estudo, somadas a um controle eficiente do TU de entrada e do TU de saída do cavaco de madeira do secador, o saldo energético apresentar-se energeticamente positivo.

O melhor cenário observado no estudo corresponde ao CE-C. Neste cenário encontra-se o menor consumo energético de combustíveis utilizados para a secagem do cavaco de madeira. Apenas três simulações realizadas no CE-C são energeticamente negativas. O processo de secagem torna-se viável na maioria das interações realizadas, sob o ponto de vista da energia liberada pelo cavaco úmido e pelo cavaco seco em secador rotativo. A biomassa do CE-B, que constitui o cenário base deste estudo, apresenta um TU de 55%, porém, o TU exigido para os cavacos não pode exceder 42%, caracterizando a secagem da madeira como um processo necessário antes de sua combustão industrial.

## 2.4 DISCUSSÃO

Este trabalho buscou analisar o PCL da utilização do cavaco de madeira para geração de energia térmica, considerando diferentes TU e TC. Bem como, avaliar o saldo energético de um secador rotativo de biomassa florestal, visando indicar se a secagem do cavaco se apresenta como um processo energeticamente positivo.

Os resultados encontrados aqui, indicaram que a melhor condição energética do cavaco de madeira está relacionada a TU menores que 40%. Isso acontece porque parte da energia é dissipada para a evaporação da água contida na madeira, ao invés de fornecer energia sob a forma de calor, bem como, altos níveis de TC significam a porção da madeira que não queima e, portanto, não gera calor (BRAND, 2010). Conforme Campos, Rosa e Borga (2017), a umidade da biomassa apresenta interação com a eficiência energética, pois no estudo dos autores, a biomassa com 25% de TU apresentou média de 89,10% de eficiência, enquanto que a biomassa com 52% de TU apresentou uma média de 72,85% de eficiência em sua queima, ou seja, reduziu sua eficiência energética.

Conforme os resultados encontrados nesse trabalho, percebeu-se que elevados TU e TC influenciam negativamente no PCL do cavaco de madeira. De acordo com Deboni et al. (2019a), a diminuição do TU e TC apresenta influência direta no aumento do PCL, visto que



estes parâmetros influenciam diretamente na qualidade da biomassa. Consoante, Furtado et al. (2012b) perceberam em seu estudo uma alta correlação negativa, existente entre o PCL e TU, onde o menor TU relacionou-se ao maior PCL. Denota-se, que para a produção de vapor o TU interfere negativamente, com um aumento de 20% para 50% no TU a produção de vapor por tonelada de biomassa caiu de 5.000 kg para 3.600 kg (OVEISI et al., 2018). De maneira análoga, Jesus et al. (2018) verificaram a relação existente entre massa e saldo energético de carvão vegetal por meio de pirólise, percebendo que o TU da madeira afetou a energia total liberada, sendo que houve uma maior demanda de calor de secagem para os maiores níveis de TU.

Conforme Campos, Rosa e Borga (2017), o TU da biomassa de *pinus* sp. influencia na eficiência da combustão e, por consequência, na geração de cinzas, devido ao fato de a combustão ser mais completa quando o TU for menor. Os autores perceberam uma redução de 0,187 m<sup>3</sup> no TC, entre a biomassa com 52% de TU e a biomassa com 25% de TU. O TC do cavaco de madeira tende a apresentar valores próximos de 1,67% (DEBONI et al., 2019a), 1,97% (PECENKA; LENZ; IDLER, 2018), 2,02% (CIVITARESE et al., 2018). Ainda, maiores TC podem estar relacionados à contaminação da madeira por poeira, solo ou outros componentes (BRAND, 2010). Conforme Deboni et al. (2019a), o cavaco de madeira apresenta menor risco de contaminação com sujeira ou outros materiais, pois é armazenado em silos, carregado e transportado por caminhões até as indústrias consumidoras, o que contribui para um menor TC.

O melhor cenário de consumo energético para a secagem do cavaco corresponde ao CE-C. Neste cenário verifica-se o menor consumo energético de combustíveis utilizados para a secagem do cavaco de madeira. O processo de secagem torna-se viável na maioria das interações realizadas, sob o ponto de vista da energia liberada pelo cavaco úmido e pelo cavaco seco em secador rotativo. O CE-A é a pior situação de operação do sistema de secagem, pois corresponde ao cenário de maior consumo energético para a secagem. De modo alternativo ao consumo energético para a secagem, seria o aproveitamento de calor de fontes externas ou pela queima de combustíveis, como o óleo ou a própria biomassa, ou a combinação destes (DYKEN; BAKKEN; SKJELBRED, 2010).

Neste estudo, percebeu-se que o saldo de energia passa a ser energeticamente viável a partir de uma diferença de pelo menos 15%, entre o TU de entrada do cavaco no secador rotativo e o seu TU de saída do secador rotativo. Conforme Giudise et al. (2019), a secagem das aparras de madeira reduziu em 17% o TU para álamo e 31% para a videira e a acácia. Ainda, com a biomassa seca observaram um aumento no PCL de 51%, 33,1% e 43,0% para a madeira de álamo, videira e acácia, respectivamente, o que resultou em um aumento da eficiência térmica

de 12% para a videira, 27% para a acácia e 37% para o álamo. A redução do TU de 60% para 50%, demanda menos energia do que reduzir de 20% para 10%, devido à dependência do valor de aquecimento da biomassa (DYKEN; BAKKEN; SKJELBRED, 2010).

Brand e Giesel (2017) perceberam que a redução do TU causou um aumento da geração de vapor e uma redução do consumo de combustíveis auxiliares na caldeira. Porém, o efeito foi sentido de forma mais significativa para caldeira antigas, enquanto em caldeiras mais modernas, por serem projetadas para operar com maior TU, não apresentam redução na geração de vapor. Tal constatação evidencia a necessidade de se considerar também o tipo de equipamento e a tecnologia utilizada para a geração de vapor para subsidiar a tomada de decisão quanto ao processo de secagem de biomassa.

## 2.5 CONCLUSÃO

O estudo teve como finalidade analisar o PCL do cavaco de madeira sob diferentes TU e TC por meio de simulações de energia produzida, bem como, a realização do saldo energético do processo de secagem por secador rotativo.

Considerou-se faixas de 20 a 60% de TU e de 1 a 20% de TC para as simulações de energia do cavaco de madeira. Verificou-se uma relação direta entre o PCL da biomassa e a qualidade da mesma, sendo que os melhores valores energéticos ficaram associados aos menores níveis de TU, sendo este o parâmetro de maior influência sobre o PCL.

Em relação ao saldo energético, foram estabelecidas duas ROTAS para comparação. Uma correspondente ao cavaco úmido (rota 1) e outra correspondente ao cavaco seco (rota 2). O cavaco seco apresentou PCL superior ao cavaco úmido ( $2.485.117,62 \text{ kcal.t}^{-1}$  e  $1.713.838,22 \text{ kcal.t}^{-1}$ , respectivamente). Portanto, considerando o cenário base deste estudo, a utilização do cavaco seco resulta em energia líquida superior quando comparada com o cavaco úmido, ou seja, é energeticamente mais vantajoso.

O saldo energético é influenciado pelas energias consumidas durante o processo de secagem industrial, principalmente pela biomassa utilizada como combustível que alimenta a fornalha do secador, e também pelo nível de redução do conteúdo de umidade do cavaco durante o processo. Essa influência apresentou resultados predominantemente positivos em 70% das 120 simulações do saldo energético, evidenciando que o processo de secagem do cavaco de madeira por secador rotativo apresenta-se como uma atividade energeticamente positiva e aplicável.

Esta pesquisa corrobora para que os tomadores de decisão possam ajustar seus processos de modo a melhorar a eficiência energética de seus produtos. Evidencia também os benefícios atrelados à utilização do cavaco de madeira com melhor padrão de qualidade.

## REFERÊNCIAS

ALAMIA, A.; STRÖM, H.; THUNMAN, H. Design of an integrated dryer and conveyor belt for woody biofuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 77, p. 92–109, 2015.

ANP - Agência Nacional do Petróleo. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2019**. 2019. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/2019-anuario-versao-impressao.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2019.

ARABI, M. et al. Evaluation of thin-layer models for describing drying kinetics of poplar wood particles in a fluidized bed dryer. **Particulate Science and Technology**, v. 35, n. 6, p. 723–730, 2017.

BEN - **Balço energético Nacional**. 2003. Disponível em: [http://www.agg.ufba.br/ben2003/BEN2003\\_port.pdf](http://www.agg.ufba.br/ben2003/BEN2003_port.pdf). Acesso em: 17 ago. 2019.

BRAND, M. A.. **Energia de biomassa florestal**. 01. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. v. 01. 114p.

BRAND, M. A. et al. Influência das dimensões da biomassa estocada de *Pinus taeda* L. E *Eucalyptus dunnii* Maiden na qualidade do combustível para geração de energia. **Revista Árvore**, v. 38, p. 175–183, 2014.

BRAND, M. A.; GIESEL, G. Influência da secagem da biomassa na eficiência de caldeira de cogeração energética. **Energia na Agricultura**, v. 32, p. 132–140, 2017.

BRASIL. Lei n. 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União, 2017.

CAMPOS, R. F. F. DE; ROSA, L. DELLA; BORGA, T. Análise do processo de co-combustão da biomassa, através da influência da umidade do cavaco na emissão de contaminantes atmosféricos, eficiência energética e geração de cinzas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, p. 1471–1480, 2017.

CIVITARESE, V. et al. Production of selected short - rotation wood crop species and quality of obtained biomass. **European Journal of Forest Research**, v. 137, n. 4, p. 541–552, 2018.

DEBONI, T. L. et al. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. **Renewable Energy**, v. 135, p. 1291–1302, 2019a.

DEBONI, T. L. et al. Models for estimating the price of forest biomass used as an energy source: A Brazilian case. **Energy Policy**, v. 127, p. 382–391, 2019b.

DYKEN, S. VAN; BAKKEN, B. H.; SKJELBRED, H. I. Linear mixed-integer models for biomass supply chains with transport, storage and processing. **Energy**, v. 35, n. 3, p. 1338–1350, 2010.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. Brasília, p. 345, 2018.

FURTADO, T. S. et al. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para geração de energia em Lages, SC. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4, p. 795–802, 2012a.

FURTADO, T. S. et al. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 36, n. 3, p.577-582, set. 2012b.

GIUDICE, A. DEL et al. Wood Chip Drying through the Using of a Mobile Rotary Dryer. **Energies**, v. 12, p. 16, 2019.

JESUS, M. S. et al. Energy and mass balance in the pyrolysis process of eucalyptus wood. **Cerne**, v. 24, n. 3, p. 288–294, 2018.

KAPLAN, O.; CELIK, C. An experimental research on woodchip drying using a screw conveyer dryer. **Fuel**, v. 215, n. October 2017, p. 468–473, 2018.

KORUS, A.; SZLEK, A. The effect of biomass moisture content on the IGCC efficiency. **Biomass and Bioenergy**, v. 80, p. 222–228, 2015.

KUPTZ, D. et al. Evaluation of combined screening and drying steps for the improvement of the fuel quality of forest residue wood chips—results from six case studies. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 9, n. 1, p. 83–98, 2019.

LEHTOVAARA, J. Calorific value – Status of the standardisation. In: International Conference “Standardisation of solid biofuels, 6 th-7th October, 2004, Leipzig, Germany. Anais eletrônicos... Disponível em: <<http://www.energetikleipzig.de/BioNorm/conference.htm>> Acesso em: 17 mai. 2019.

MALEK, A. B. M. A. et al. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of a 10 MW biomass-based power plant in Malaysia. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 502–513, 2017.

MARQUES, A. et al. Planning woody biomass supply in hot systems under variable chips energy content. **Biomass and Bioenergy**, v. 108, n. November 2017, p. 265–277, 2018.

MIRANDA, Marcos Antonio da Silva. **Potencial da biomassa florestal para produção de energia térmica industrial**. 2015. Dissertação - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2015.

- MOHSENI, M. et al. Biomass drying in a vibrating fluidized bed dryer with a Lagrangian-Eulerian approach. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 138, n. January, p. 219–234, 2019.
- OVEISI, E. et al. In-depot upgrading the quality of fuel chips for a commercial gasification plant. **Biomass and Bioenergy**, v. 108, n. February 2017, p. 138–145, 2018.
- PECENKA, R.; LENZ, H.; IDLER, C. Influence of the chip format on the development of mass loss, moisture content and chemical composition of poplar chips during storage and drying in open-air piles. **Biomass and Bioenergy**, v. 116, n. June, p. 140–150, 2018.
- SIMIONI, F. J. et al. Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 731–742, 2017.
- SIMIONI, Flávio José et al. Cadeia produtiva de energia de biomassa florestal: o caso da lenha de eucalipto no polo produtivo de Itapeva - SP. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p.310–323, 2 abr. 2018. Universidade Federal de Santa Maria.
- SIMIONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. Cadeia produtiva de energia de biomassa na região do Planalto Sul de Santa Catarina: uma abordagem prospectiva. **Revista Árvore**, v. 34, n. 6, p. 1091–1099, 2011.
- SILVA, C. M. S. da. et al. Structural and compositional changes in eucalyptus wood chips subjected to dry torrefaction. **Industrial Crops and Products**, v. 109, n. July, p. 598–602, 2017.
- STENSTRÖM, S. Drying of biofuels from the forest - A review. **Drying Technology**, v. 35, n. 10, p. 1167–1181, 2017.
- VASKOVIC, S. et al. Multi-criteria optimization concept for the selection of optimal solid fuels supply chain from wooden biomass. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 36.1, p. 109–123, 2015.
- VERMA, M. et al. Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 732–741, 2017.



### 3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA E DE RISCO DA SECAGEM INDUSTRIAL DE CAVACO DE MADEIRA

**RESUMO:** A biomassa florestal tem conquistado espaço no mercado energético, principalmente nas indústrias para obtenção de energia térmica. Frente ao seu crescente consumo, surgem algumas necessidades de melhoria deste combustível, dentre elas, evidencia-se a diminuição do Teor de Umidade (TU) por meio de secadores industriais. Assim, devido a viabilidade energética já comprovada do processo, procedeu-se com a análise de viabilidade econômica, deste modo, este capítulo teve como objetivo realizar uma avaliação da viabilidade econômica de um empreendimento que realiza a secagem de cavaco de madeira, por meio de um secador rotativo, para geração de energia térmica. Em adição, verificou-se os riscos associados a esse tipo de investimento, de modo a apresentar instrumentos de análise que permitem subsidiar a tomada de decisão sob condições de incerteza. O projeto baseou-se em uma indústria local que realiza a secagem do cavaco por meio de secador rotativo, permitindo que estabelecesse um cenário base de consumo energético (CE-B) para a secagem da biomassa, e a partir deste, um cenário com acréscimo de 25% (CE-A), e um cenário com diminuição de 25% (CE-C) dos gastos energéticos para a secagem do cavaco. Para todos os cenários foram realizadas análises de sensibilidade e de risco para determinação dos indicadores econômicos, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). Os resultados apontaram o projeto como economicamente viável, tendo um VPL de R\$ 5.726.223,68, TIR de 60,23%, *payback* descontado de 1,63 anos e Relação Benefício Custo de 1,39. A variável preço de venda do cavaco de madeira foi a que apresentou maior sensibilidade no projeto. A análise de risco, feita com 100.000 simulações apresentou uma TIR de pelo menos 23,91%, e um VPL de pelo menos R\$ 1.755.547,27 correspondente ao CE-A, onde há o maior consumo energético para a secagem do cavaco de madeira. Percebe-se, por meio do estudo, que o projeto é um investimento economicamente viável, e também, apresenta-se como uma atividade importante para a melhoria da qualidade do cavaco de madeira utilizado como fonte de energia térmica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Indicadores econômicos, Simulação de Monte Carlo, Análise de Sensibilidade.

**ABSTRACT:** Forest biomass has conquered space in the energy market, mainly in industries to obtain thermal energy. Due to its growing consumption, some needs for improvement of this fuel arise, among them, the decrease of the Moisture Content (TU) through industrial dryers. Thus, due to the already proven energetic viability of the process, an economic viability analysis was carried out, thus, this chapter aimed at carrying out an evaluation of the economic viability of an enterprise that dries wood chips by means of a rotary dryer for thermal energy generation. In addition, the risks associated with this type of investment were verified, in order to present analysis instruments that allow subsidizing decision making under uncertain conditions. The project was based on a local industry that dries wood chips by means of a rotary dryer, allowing it to establish a baseline scenario of energy consumption (CE-B) for the drying of biomass, and from this, a scenario with an increase of 25% (CE-A), and a scenario with a decrease of 25% (CE-C) of the energy expenses for the drying of chips. For all scenarios sensitivity and risk analyses were carried out for determining the economic indicators, Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR). The results indicated the project as economically viable, with a NPV of R\$ 5,726,223.68, IRR of 60.23%, discounted payback of 1.63 years and a Benefit Cost Ratio of 1.39. The variable wood chip sales price was the one that showed the greatest

sensitivity in the project. The risk analysis, made with 100,000 simulations presented an IRR of at least 23.91%, and a NPV of at least R\$ 1,755,547.27 corresponding to the CE-A, where there is the highest energy consumption for drying wood chips. The study shows that the project is an economically viable investment, and also presents itself as an important activity for improving the quality of wood chips used as a source of thermal energy.

**Keywords:** Economic Indicators, Monte Carlo Simulation, Sensibility Analysis.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Uma das metas da Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (COP 24) é a redução de emissões atmosféricas que contribuem para o aquecimento global. Neste contexto, a adoção de energias renováveis apresenta-se como uma alternativa com menor impacto às mudanças climáticas (SUTTLES et al., 2014), bem como, como uma alternativa ao esgotamento das fontes convencionais de energia (KLUCZOWSKI, 2018). Sob esta perspectiva, a produção de lenha da silvicultura vem aumentando no Brasil, sendo que de 2001 a 2013, passou de 30 para 55,2 milhões de metros cúbicos (SIMIONI et al., 2017) e em 2018 este valor ficou em 52,6 milhões de metros cúbicos (IBGE, 2018).

A produção de bioenergia ainda carece em explorar aspectos socioeconômicos e ambientais, visando apoiar decisões de planejamento energético regional, desenvolvimento local e manejo agrícola e florestal sustentável (NIKODINOSKA et al., 2018). Do mesmo modo, Furtado et al. (2012) denotam que devem ser considerados fatores econômicos, sociais, ambientais e técnicos no uso da biomassa para gerar energia. Além disso, à medida que a capacidade de geração energia aumenta, os fatores envolvidos também irão aumentar, como, a logística de colheita, a extração, a secagem e o armazenamento (PRATES; SCHAITZA, 2018). A falta de estudos econômicos e técnicos, a disponibilidade de dados de negócios florestais e a baixa atenção ao setor florestal como mitigador de impactos climáticos são alguns dos desafios do setor (HERNÁNDEZ; JAEGER; SAMPERIO, 2018). Em análise, eles destacam que existe uma alta sensibilidade nos parâmetros preço e custo dos resíduos florestais para a geração de bioenergia.

Outrossim, Lopes; Brito e Moura (2016) destacam que, dentre as razões para a utilização de cavacos de madeira, estão, a origem do cavaco de fonte renovável ou de resíduo industrial, maior homogeneidade na combustão e a possibilidade de automatização da alimentação das fornalhas. Considerando a madeira como uma importante fonte de energia térmica, Miranda (2015) salienta que, o cavaco é capaz de produzir vapor com menor custo e vantagens em



relação a lenha, como a mecanização do processo, o controle de umidade, a logística de produção e transporte e a qualidade do vapor. Em contrapartida, Paolotti et al. (2017) realizaram uma avaliação econômica e ambiental de biomassa florestal para aquecimento, considerando lenhas e aparras de madeira, sendo que destas, a produção de madeira para lenha mostrou-se mais lucrativa do que as aparras. O valor econômico das aparras foi constatado pela autora como um subproduto do processo extração de madeira.

Lopes; Brito e Moura (2016) apresentam que um dos fatores que mais interferem para a queima eficiente do cavaco de madeira é a qualidade do material, o que inclui maior constância no tipo de madeira, TU e homogeneidade. Em concordância, Sahoo et al. (2019), perceberam que para os briquetes feitos com cavaco de madeira, o parâmetro de entrada mais sensível apontado em seu estudo foi o TU. Os autores também denotaram que altos teores de umidade demandam maior consumo de energia para a secagem dos cavacos de madeira. Conforme Bauer e Sellitto (2019), uma das barreiras econômicas verificadas é o elevado consumo energético para a secagem da madeira, quando esta conter alto TU.

Em consonância, Shah et al. (2011) realizaram uma análise tecnoeconômica de um sistema de torrefação de biomassa. Os resultados apontaram que quanto maior o TU maior o custo de operação do sistema de torrefação. Além disso, os autores denotaram a necessidade da determinação de técnicas para reduzir o TU da biomassa antes da torrefação, com enfoque tecnoeconômico. Similarmente, Deboni et al. (2019) realizaram um estudo sobre a compra de biomassa conforme seu conteúdo energético, onde associaram parâmetros de qualidade da biomassa, como TU e cinzas. Conforme os autores, torna-se benéfico para as indústrias a aquisição de biomassa com melhor conteúdo energético, o que está intrinsecamente relacionado com o TU dela.

Deste modo, alguns estudos sobre projetos de avaliação econômica podem contribuir para nortear as decisões de investimentos no setor. Evison (2018), destaca dois métodos para calcular o retorno investido, utilizando dados do mercado de ações de empresas madeireiras, ou, utilizando dados sobre receitas e rendimentos de custos por meio de análise de fluxo de caixa descontado. Ademais, Kuppens et al. (2018), mapearam a incerteza total no VPL de um investimento em um sistema de pirólise rápida para a produção combinada de calor e energia a partir de madeira de salgueiro. Pela combinação dos métodos de Simulação de Monte Carlo e planejamento experimental, identificaram os principais parâmetros econômicos e técnicos que influenciam a lucratividade do projeto estudado. Dentre os parâmetros destacados por Kuppens et al. (2018) estão, a quantidade de terra arável, o rendimento da biomassa, o preço de compra da madeira, os incentivos políticos e o rendimento do produto de pirólise rápida.

Outrossim, Prates e Schaitza (2018), realizaram uma pesquisa sobre a viabilidade econômica de um sistema simulado de geração de energia pela gaseificação de cavacos de madeira. Em sua análise, também utilizaram a simulação de Monte Carlo para avaliar o risco do projeto, com o software *@Risk 7.50* da *Palisade Corporation*. Os autores perceberam que o projeto é economicamente viável desde que exista algum incentivo externo ao investimento, bem como, um aumento do desenvolvimento de pesquisas sobre micro geração de energia. Ainda, dentre as barreiras observadas para o desenvolvimento de sistemas de gaseificação mais eficientes, com cavacos de madeira, estão o desenvolvimento de equipamentos apropriados para a preparação da matéria prima.

Também, Cardoso; Silva e Eusébio (2019) realizaram uma análise técnico-econômica de uma usina de gaseificação de misturas de biomassa, na qual, de modo similar, aplicaram a simulação de Monte Carlo para avaliar o risco do investimento. Dentre os resultados obtidos, os autores perceberam que o VPL do projeto foi altamente sensível ao preço de venda e a produção de eletricidade. Em conformidade, Seo et al. (2017) realizaram um estudo sobre uma usina combinada de calor e energia com biomassa. Com a análise de sensibilidade dos fatores mais significativos perceberam que o investimento na usina pode ser atraente se houver uma receita adicional com a venda de calor e vantagens por meio da política de créditos de energia do país de estudo.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma avaliação da viabilidade econômica de um empreendimento que realiza a secagem de cavaco de madeira, por meio de um secador rotativo, para geração de energia térmica. Em adição, verificou-se os riscos associados a esse tipo de investimento, de modo a apresentar instrumentos de análise que permitem subsidiar a tomada de decisão sob condições de incerteza.

## 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados nas análises deste trabalho estão dispostos em cinco subitens. Primeiro apresenta-se o escopo e cenários estudados, seguido da composição do fluxo de caixa, da análise econômico financeira, da análise de sensibilidade e da análise de risco.

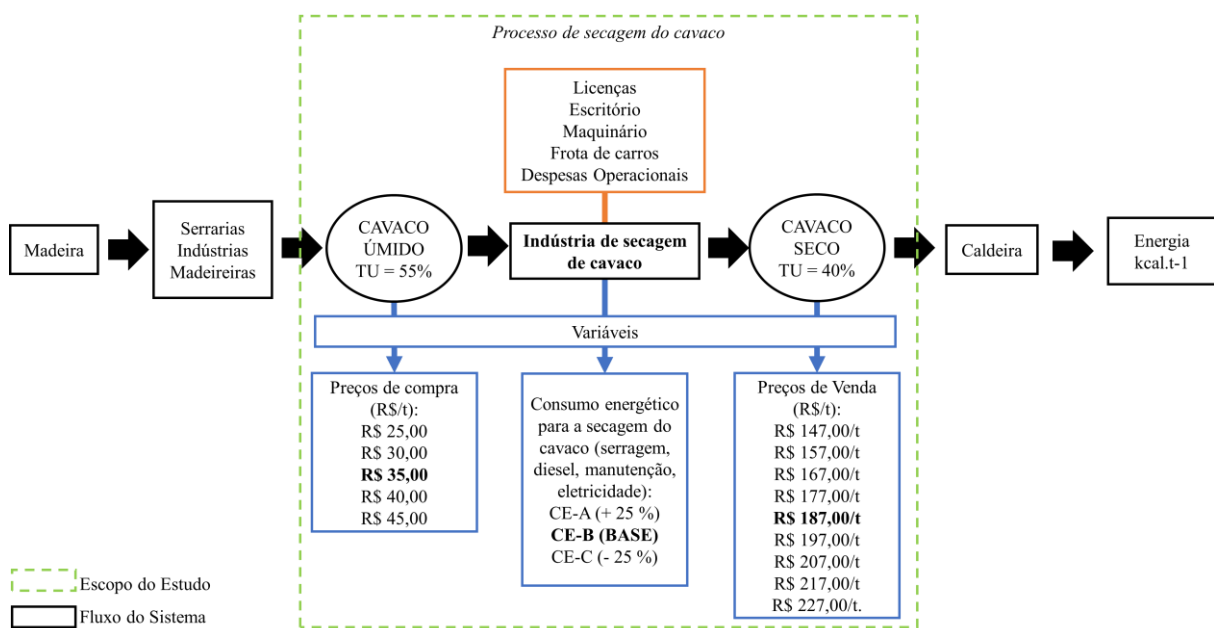
### 3.2.1 Escopo e cenários estudados

O cenário energético base (CE-B) do estudo foi elaborado a partir da realidade de uma empresa localizada no planalto Sul do estado de Santa Catarina, que realiza a secagem de

cavaco de madeira por meio de um secador rotativo. Para a elaboração do CE-B foram realizadas visitas à empresa para a coleta de dados pertinentes à atividade industrial de secagem de cavaco de madeira e a elaboração do fluxo de caixa do empreendimento.

O empreendimento do CE-B opera em um local alugado, com instalações prediais de aproximadamente 300 m<sup>2</sup> de área construída e um terreno com área de aproximadamente 1000 m<sup>2</sup>, utilizado para armazenamento e fluxo de veículos de carga e descarga do cavaco de madeira. O beneficiamento do cavaco úmido começa com o recebimento do material (cerca de 1.631,4 t/mês), com aproximadamente 55% de TU, proveniente de diversos fornecedores locais. Do pátio da empresa, o cavaco úmido é encaminhado para um secador rotativo que funciona em conjunto com uma fornalha, com aproximadamente 1000 °C, onde permanece o tempo necessário para a redução do TU para o nível de 40%. A fornalha do secador é alimentada com serragem, adquirida pela empresa apenas para o processo de secagem. Durante a secagem do cavaco são gerados particulados, os quais são removidos por um ciclone. Depois de seco, o cavaco é comercializado para as indústrias da região que o utilizam para a geração de energia térmica (vapor). O escopo que envolve o estudo do processo de secagem pode ser observado pela Figura 10.

Figura 10 - Escopo geral do empreendimento de secagem de cavaco, variáveis e cenários de avaliação do projeto.



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

A partir da elaboração do CE-B foi possível estabelecer outros dois cenários, um mais favorável e outro menos favorável, para a percepção de como o projeto poderia se comportar caso ocorressem variações de consumo energético durante a etapa de secagem, para mais ou para menos. Assim, definiu-se como CE-A (Cenário Energético A) o cenário menos favorável, considerando-se um acréscimo de 25% no consumo energético durante a secagem do cavaco. Do mesmo modo, definiu-se CE-C (Cenário Energético C) como o cenário mais favorável, considerando um decréscimo de 25% no consumo energético durante a secagem do cavaco de madeira.

O consumo energético para a secagem do cavaco de madeira é variável para mais 25% (CE-A) ou para menos 25% (CE-C) a partir do CE-B. Este item é composto pela eletricidade, diesel e serragem, e somado a este valor também foi considerado 10% destes gastos acrescentados para a manutenção dos equipamentos e veículos que compõem o processo de secagem do cavaco de madeira.

O preço de compra do cavaco de madeira para o CE-B corresponde a R\$ 35,00 t<sup>-1</sup>. A partir deste valor base, foram propostos valores maiores para a compra, correspondendo a R\$ 40,00 t<sup>-1</sup> e R\$ 45,00 t<sup>-1</sup>, e dois valores menores, R\$ 30,00 t<sup>-1</sup> e R\$ 25,00 t<sup>-1</sup>, considerando possíveis variações de mercado. O preço de venda do cavaco de madeira para o CE-B corresponde a R\$ 187,00 t<sup>-1</sup>. A partir deste valor considerou-se quatro preços menores, e quatro preços maiores de venda para o cavaco de madeira, sendo R\$ 147,00 t<sup>-1</sup>, R\$ 157,00 t<sup>-1</sup>, R\$ 167,00 t<sup>-1</sup>, R\$ 177,00 t<sup>-1</sup>, R\$ 187,00 t<sup>-1</sup> (CE-B), R\$ 197,00 t<sup>-1</sup>, R\$ 207,00 t<sup>-1</sup>, R\$ 217,00 t<sup>-1</sup> e R\$ 227,00 t<sup>-1</sup>.

### **3.2.2 Composição do fluxo de caixa**

O fluxo de caixa foi elaborado atentando-se ao modelo para empreendimentos apresentado por Casarotto Filho e Kopittke (2010), considerando o cenário base (CE-B), para um período de avaliação de 10 anos. O fluxo de caixa representa as entradas e saídas ao longo do tempo, sendo uma ferramenta de indicação para projeções na gestão do negócio (KUHN, 2012). Os custos a serem considerados em um projeto de investimento compreendem aqueles decorrentes de transações dos ativos e decorrentes da operação dos ativos. Conforme Ribeiro et al. (2016), o investimento inicial deve considerar os custos de instalação do novo ativo e se ocorrer, a variação de capital de giro líquido.

O investimento inicial (I<sub>0</sub>) (Tabela 1), compreendeu as licenças ambientais, escritório, máquinas e veículos, junto à empresa do setor florestal, como já referenciado na subseção

anterior. Os dados também foram aferidos e complementados via pesquisa de mercado. O valor residual do  $I_0$  foi obtido considerando a estimativa da depreciação de cada item, pelo método linear, considerando sua vida útil indicada pelo fabricante ou estimada a partir das informações da empresa local.

Tabela 1 - Investimento inicial do empreendimento para secagem de cavaco de madeira.

<b>Componente</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Depreciação</b>	<b>Valor Final</b>
Licenças Ambientais	R\$ 12.000,00	-	-
Escritório	R\$ 4.300,00	R\$ 4.100,00	R\$ 200,00
Máquinas Industriais	R\$ 1.290.000,00	R\$ 774.000,00	R\$ 516.000,00
Máquinas e Veículos de Transporte	R\$ 495.000,00	R\$ 315.500,00	R\$ 179.500,00
Capital de Giro (1º mês)	R\$ 102.161,57	-	-
<b>Total</b>	<b>R\$ 1.448.240,00</b>	<b>R\$ 1.093.600,00</b>	<b>R\$ 695.700,00</b>

Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

O maior valor empenhado para o  $I_0$  corresponde à aquisição do maquinário, o qual inclui o secador rotativo, exaustor primário, exaustor de tiragem e filtros, ligações elétricas, moega e fornalha. A frota de máquinas e veículos é composta por carregadeira, caminhões e utilitário. No que tange ao capital de giro, foram considerados o custo médio mensal com matéria prima, mais as despesas operacionais e o consumo energético para um mês de operação da indústria.

Para a composição do fluxo de caixa, os custos para o empreendimento de secagem de cavaco foram divididos dadas as especificidades da empresa, sendo, as despesas operacionais, o consumo energético para a secagem do cavaco, os custos com aquisição da matéria prima, deduções sobre as vendas e imposto de renda, todos calculados para um ano de atividade (Tabela 2).

Tabela 2 - Componentes das despesas anuais.

<b>Componente</b>	<b>Valor Médio Anual</b>
Despesas Operacionais	R\$ 288.054,08
Consumo Energético	R\$ 252.692,53
Matéria Prima	R\$ 685.192,23
Deduções sobre vendas	R\$ 210.592,36
Imposto de Renda	R\$ 370.447,58
<b>Total</b>	<b>R\$ 1.806.978,78</b>

Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

A média das despesas operacionais compreendem os valores despendidos com os colaboradores, combustíveis, aluguel, manutenções dos veículos, comunicação e segurança. O consumo energético compreende todas as energias consumidas para a secagem do cavaco de madeira, os quais variam conforme a quantidade de cavaco processado, sendo a eletricidade, a

serragem, a manutenção e os combustíveis fósseis. Por fim, a matéria prima, que representa a maior quantia financeira, e que é correspondente ao cavaco úmido adquirido pela indústria para secagem e posterior venda. A indústria entrega, em média, 1.223,5 t de cavaco seco por mês, sobre o qual considerou-se a taxa de imposto de renda de 30% sobre o lucro líquido anual e as deduções sobre as vendas foram de 7,67% ao ano, conforme dados da pesquisa.

### 3.2.3 Análise econômico-financeira

A análise econômico-financeira foi realizada considerando alguns indicadores, dentre eles, o *payback* descontado, a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Valor Presente Líquido (VPL), o Valor Presente Líquido anualizado (VPLa) ou Valor Anual Equivalente (VAE) e a relação Benefício/Custo (B/C).

O *payback* descontado, calculado pela equação (3), expressa o tempo de recuperação do capital investido, considerando os fluxos de caixa descontados por uma taxa de desconto (SAMANEZ, 2009).

$$I_0 = \sum_{t=1}^t \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (3)$$

Onde:

$I_0$  = investimento inicial

$FC_t$  = fluxo de caixa no período t

$k$  = custo do capital

O VPL, expresso na equação (4) é medido por meio da diferença entre o valor presente de todas as entradas e saídas de caixa (KUHN, 2012), medindo o valor presente dos fluxos de caixa gerados pelo projeto ao longo de sua vida útil, sendo o projeto economicamente viável se o VPL for positivo (SAMANEZ, 2009).

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (4)$$

Onde:

$FC_t$  = fluxo de caixa no t-ésimo período

$t$  = período de tempo

$k$  = taxa de desconto

O VPL é sensível a taxa  $k$ , que representa a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) utilizada, sendo que quanto maior a TMA, menor o VPL obtido. Utilizou-se a TMA no valor de 6,0%, considerando as flutuações da diferença entre o Sistema Especial de Liquidação e de Custódia – SELIC e a inflação atual, dos últimos 10 anos.

O VPLa transforma o VPL do projeto em uma série uniforme equivalente, e foi calculado com a equação (5) (SAMANEZ, 2009).

$$VPLa = \frac{VPL}{a_{t k\%}} \quad (5)$$

Onde:

$$a_{t k\%} = \text{fator de valor presente de séries uniformes} = \left[ \frac{(1+k)^t - 1}{(1+k)^t * k} \right]$$

$k$  = taxa de desconto

$t$  = prazo da alternativa.

A TIR, calculada pela equação (6), é a taxa de retorno do investimento, observando a condição de que se  $i^* >$  custo de capital, o projeto é economicamente viável (SAMANEZ, 2009).

$$TIR = \sum_{t=1}^t \frac{FC_t}{(1+i^*)^t} - FC_0 = 0 \quad (6)$$

Onde:

$FC_0$  = Valor do Fluxo de Caixa no momento zero

$FC_t$  = Fluxos previstos de entradas ou saídas em cada período de tempo

$k$  = Taxa de desconto que iguala o VPL a zero

A relação B/C é a razão entre as entradas e saídas, incluindo o investimento inicial a uma taxa  $K$  (GITMAN, 2010), e foi calculada pela equação (7). Um índice B/C > 1 indica que o projeto é economicamente viável (SAMANEZ, 2009).

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{b_t}{(1+k)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{c_t}{(1+k)^t}} \quad (7)$$

Onde:

$b_t$  = benefícios no período t

$c_t$  = custos no período t

t = horizonte do planejamento

k = taxa de desconto

### 3.2.4 Análise de sensibilidade

Com a análise de sensibilidade identificam-se as variáveis críticas na atividade de projeção e determinação dos fluxos de caixa, considerando-se diversas hipóteses sobre o comportamento das variáveis adotadas (SAMANEZ, 2009). Para a análise de sensibilidade deve-se estabelecer os limites superior e inferior e realizar a variação de cada parâmetro, avaliando o efeito produzido na rentabilidade do investimento. Ainda, deve-se calcular o VPL e a TIR, que possibilitam uma percepção da sensibilidade das variáveis, identificando assim os pontos críticos no processo (JANOSELLI; HARBS; MENDES, 2016).

Deste modo, determinou-se o VPL e a TIR, para os três cenários energéticos, considerando o preço de compra, o preço de venda e o custo energético para a secagem do cavaco de madeira, conforme representado na Figura 1. O consumo energético para a secagem do cavaco de madeira foi considerado como uma variável que pode provocar alterações no projeto, visto que apresenta diferentes quantidades energéticas consumidas no processo de secagem do cavaco. Deste modo, foi considerado R\$ 315.865,67 para o CE-A, R\$ 252.692,53 para o CE-B e R\$ 189.519,40 para o CE-C.

Realizou-se uma análise de sensibilidade sobre a taxa de desconto, buscando analisar o comportamento do projeto baseado em diferentes valores de taxa para cada um dos três cenários energéticos. Adotou-se uma faixa de variação de 0% a 70% para a taxa de desconto. Similarmente, outra análise de sensibilidade foi realizada buscando comparar e apontar qual o parâmetro mais sensível no projeto dentre, o preço de venda, o preço de compra, o consumo energético e a taxa de desconto, considerando a elasticidade dos cenários CE-A e CE-C, ou seja, menos favorável e mais favorável ao projeto.

### 3.2.5 Análise de risco

O risco está associado à probabilidade de um de um investimento apresentar VPL < zero ou TIR < custo de capital (GITMAN, 2010), sendo que sua abordagem geralmente ocorre sob



cenários relacionados a estimativas pessimista, mais provável e otimista de fluxos de caixa. Para a análise de risco foi utilizado o método de Simulação de Monte Carlo, que permite simular meios para determinada situação até que seja encontrada uma aproximação satisfatória que o explique (SAMANEZ, 2009). A análise de risco foi realizada pelo software @Risk 7.0.0 (Palisade Corp., 2015). Adotou-se a distribuição de probabilidade *Pert* (triangular) com 100.00 interações para os três cenários energéticos (Tabela 3).

Tabela 3 - Variações realizadas na análise de risco.

Variáveis de Risco	Valor mínimo (CE-A)	Situação base (CE-B)	Valor máximo (CE-C)
Preço de compra do cavaco de madeira	R\$ 25,00	R\$ 35,00	R\$ 45,00
Preço de venda do cavaco de madeira	R\$ 147,00	R\$ 187,00	R\$ 227,00

Fonte: Elaborada pela autora.

### 3.3 RESULTADOS

Os resultados estão apresentados, em três subitens. Primeiro o fluxo de caixa e os indicadores de viabilidade econômico financeira, que compõem a análise determinística, seguida da análise de sensibilidade e análise de risco.

#### 3.3.1 Fluxo de caixa e os indicadores de viabilidade econômico financeira - Análise determinística

O fluxo de caixa considerando o CE-B (cenário base) é apresentado na Tabela 4. O ano zero representa o ano de implantação do projeto, considerando-se o somatório do investimento inicial e do capital de giro necessário para o primeiro mês do projeto. Os valores correspondentes as renovações de licenças ambientais foram diluídos ao longo dos 10 anos do projeto.

Tabela 4 - Fluxo de caixa do empreendimento para secagem de cavaco de madeira CE-B.

Descrição	Ano 0	Ano 1 ao 9	Ano 10
Investimento Inicial (I <sub>0</sub> ) - Capital Fixo	R\$ 1.448.240,00		
Investimento Inicial (I <sub>0</sub> ) - Capital de Giro	R\$ 102.161,57		
Valor Residual Capital Fixo			R\$ 556.560,00
Valor Residual Capital de Giro			R\$ 102.161,57
(-) Deduções sobre vendas		R\$ 210.592,36	R\$ 210.592,36
(=) Receita Líquida		R\$ 2.535.070,77	R\$ 2.535.070,77
(-) Custos da Matéria Prima		R\$ 685.192,23	R\$ 685.192,23
(=) Lucro Bruto		R\$ 1.849.878,55	R\$ 1.849.878,55
(-) Despesas Operacionais		R\$ 540.746,61	R\$ 540.746,61
(=) Lucro Líquido (EBITDA)		R\$ 1.309.131,94	R\$ 1.309.131,94
(-) Depreciação		R\$ 74.306,67	R\$ 74.306,67
(=) Lucro antes do IR		R\$ 1.234.825,27	R\$ 1.234.825,27
(-) Imposto de Renda (IR=30%)		R\$ 370.447,58	R\$ 370.447,58
(=) Lucro Líquido (depois do IR)		R\$ 864.377,69	R\$ 864.377,69
(+) Depreciação		R\$ 74.306,67	R\$ 74.306,67
(=) Fluxo de Caixa Livre	-R\$ 1.550.401,57	R\$ 938.684,36	R\$ 1.597.405,92

Fonte: Elaborada pela autora, conforme Casarotto Filho e Kopittke (2010).

Pela Tabela 4 percebe-se que há um investimento de R\$ 1.448.240,00 de capital fixo, o qual compreende a frota de veículos, maquinários e escritório. O capital de giro representa as despesas operacionais e energéticas e também a aquisição da matéria prima para o primeiro mês de funcionamento da empresa, sendo de R\$ 102.161,57. Ao final dos 10 anos do projeto contabiliza-se no fluxo de caixa livre do empreendimento, com R\$ 1.597.405,92, além do lucro líquido (R\$ 864.377,69) e da depreciação (R\$ 74.306,67), o valor residual do capital fixo e o valor residual do capital de giro.

Os indicadores de viabilidade econômico-financeiros do projeto (Tabela 5) demonstram um período de recuperação do investimento relativamente curto para os três cenários, de 1,71 anos a 1,56 anos, considerando o valor do dinheiro no tempo. A TIR apresenta-se maior que a TMA (6,00%) para os três cenários, com 57% para a pior condição do projeto (CE-A), 60% para o cenário base, e 63% para o cenário melhor condição para o projeto (CE-C), percebe-se que quanto mais favorável o cenário maior é a TIR. A relação B/C também é maior que 1 para os três cenários energéticos, indicando a viabilidade do projeto.

Tabela 5 - Síntese dos principais indicadores econômico-financeiros para os três cenários de consumo energético.

Indicador	Resultados		
	CE-A	CE-B	CE-C
Payback Descontado (anos)	1,71	1,63	1,56
VPL (R\$)	5.400.751,85	5.726.223,68	6.051.695,52
VPLa (R\$)	733.789,13	778.010,32	822.231,51
TIR (%)	57,33	60,23	63,12
Relação B/C	1,30	1,39	1,49

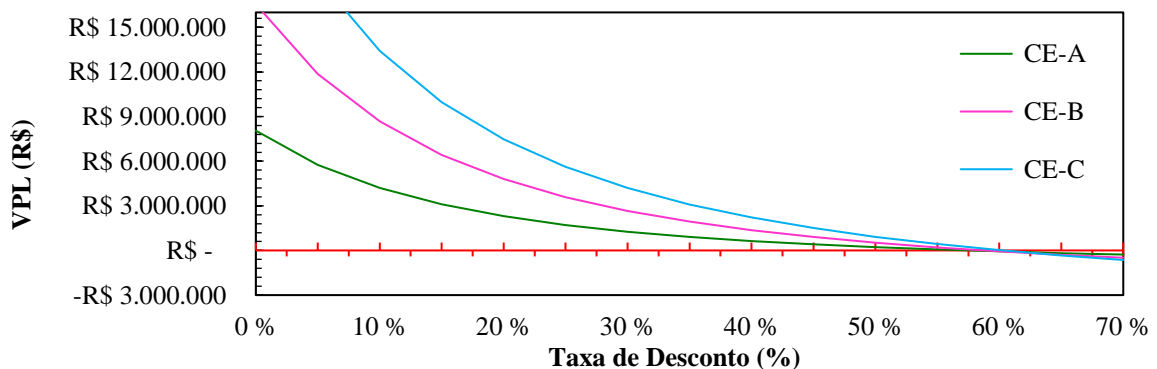
Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Os principais indicadores econômicos apresentados para os três cenários energéticos demonstram a viabilidade de execução para o projeto. O VPL é positivo para as três situações, ou seja, as receitas são maiores que as despesas. Tanto para o maior consumo energético (CE-A) com R\$ 5.400.751,85, para o consumo base (CE-B) com R\$ 5.726.223,68, e para o menor consumo energético (CE-C), com R\$ 6.051.695,52, percebe-se que quanto mais favorável cenário, maior é o VPL.

### 3.3.2 Análise de sensibilidade

Pela Figura 11 é possível observar o comportamento do VPL para os três cenários energéticos, a diferentes possibilidades de taxa de desconto. Visualiza-se, que o projeto passa a ser inviável a partir de uma taxa de desconto de 57,33% para o CE-A, 60,23% para o CE-B% e 63,12% para o CE-C.

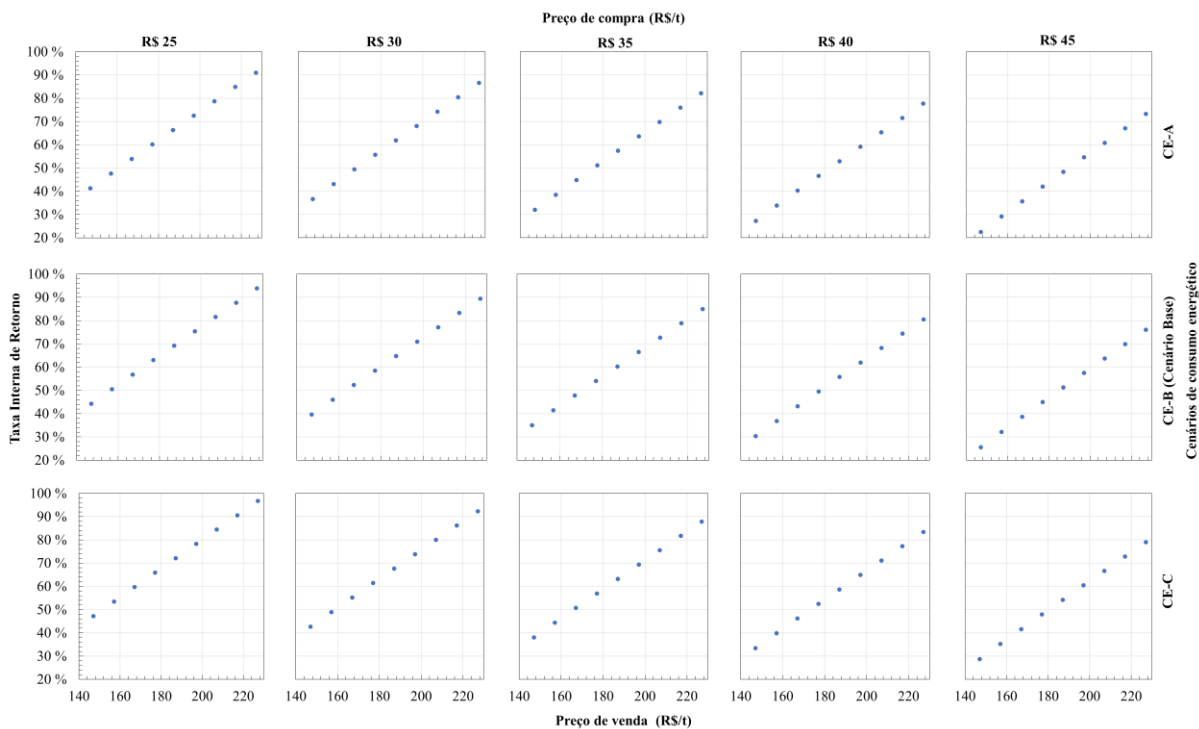
Figura 11 - Sensibilidade do VPL em função de diferentes taxas de desconto.



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Na Figura 12 é possível observar a sensibilidade apresentada na TIR para os três cenários energéticos propostos, bem como, o impacto segundo diferentes valores de compra e venda do cavaco.

Figura 12 - Taxa Interna de Retorno para diferentes níveis de preço de compra e venda de cavaco, para três cenários de consumo energético.



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

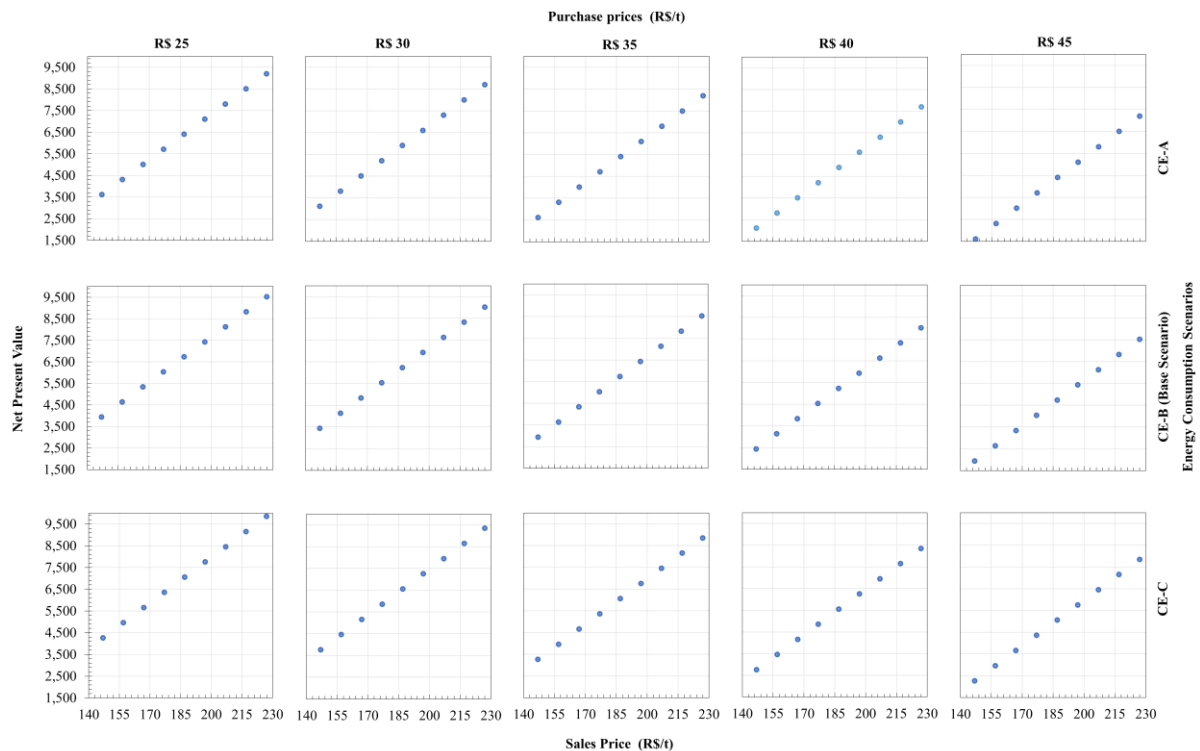
Na Figura 12 visualiza-se que das 135 interações realizadas 100% apresentam a TIR maior do que a TMA, caracterizando o projeto como economicamente viável. O CE-A, que constitui o maior consumo energético para a secagem do cavaco de madeira, apresenta a pior condição para o projeto, especialmente quando o cavaco tem preço de compra de R\$ 45,00 t<sup>-1</sup> e preço de venda de R\$ 147,00 t<sup>-1</sup>, e mesmo assim mostra-se com uma TIR de pelo menos 22%. Ademais, visualiza-se que, conforme o preço de compra do cavaco de madeira aumenta, ocorre uma diminuição linear na TIR para os três cenários, do mesmo modo, quanto maior o preço de venda do cavaco maior é a TIR. Ainda, quanto maior é o gasto energético para a secagem menores são os valores da TIR.

Para o CE-B, que apresenta as condições para o cenário base do estudo, a TIR chega ao valor de 93,8% quando o preço de compra do cavaco é de R\$ 25,00 (menor valor de compra) e o preço de venda é de R\$ 227,00 (maior valor de venda). Já, para a melhor condição para o

projeto, ou seja, onde há o menor consumo energético durante a secagem, a TIR chega ao valor máximo de 97%.

Na Figura 13 é possível observar a sensibilidade apresentada no VPL para os três cenários energéticos propostos, bem como, o efeito que o preço de compra e venda do cavaco causam em cada um.

Figura 13 - Valor Presente Líquido para diferentes níveis de preço de compra e venda de cavaco, para três cenários de consumo energético.



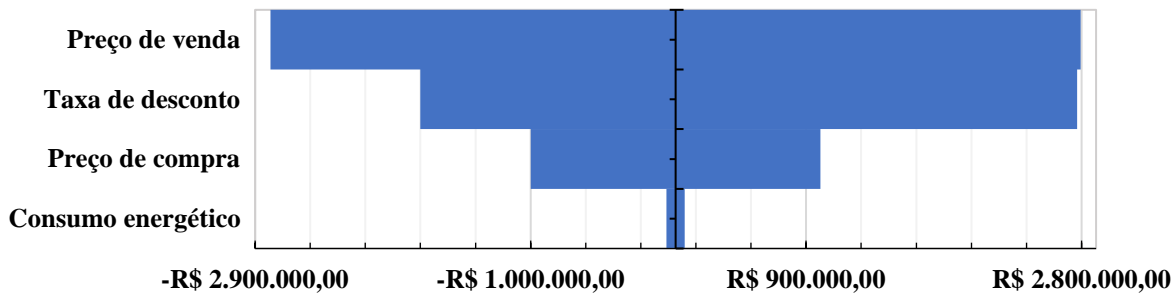
Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Conforme é possível observar nos gráficos da Figura 13, das 135 interações realizadas 100% são positivas, o que caracteriza a viabilidade do projeto, ou seja, as receitas são maiores do que as despesas. No CE-A, que corresponde ao cenário de maior consumo energético para a secagem do cavaco de madeira, visualiza-se a pior condição econômica para o projeto. Nas demais situações do cenário o VPL apresenta-se positivo, ou seja, o projeto é viável.

O cenário mais positivo é o CE-C, visto que o mesmo apresenta o menor consumo energético para a secagem do cavaco de madeira. Percebe-se, que quanto maior o preço de compra do cavaco, menor é o VPL para os três cenários energéticos, e quanto maior o consumo energético para a secagem do cavaco de madeira, menor a probabilidade de o projeto ser viável.

Pela Figura 14 visualiza-se a sensibilidade de cada uma das principais variáveis do projeto, considerando a diferença entre o pior cenário e o melhor cenário para cada variável.

Figura 14 - Sensibilidade da variação do VPL para as principais variáveis influenciadoras do projeto.



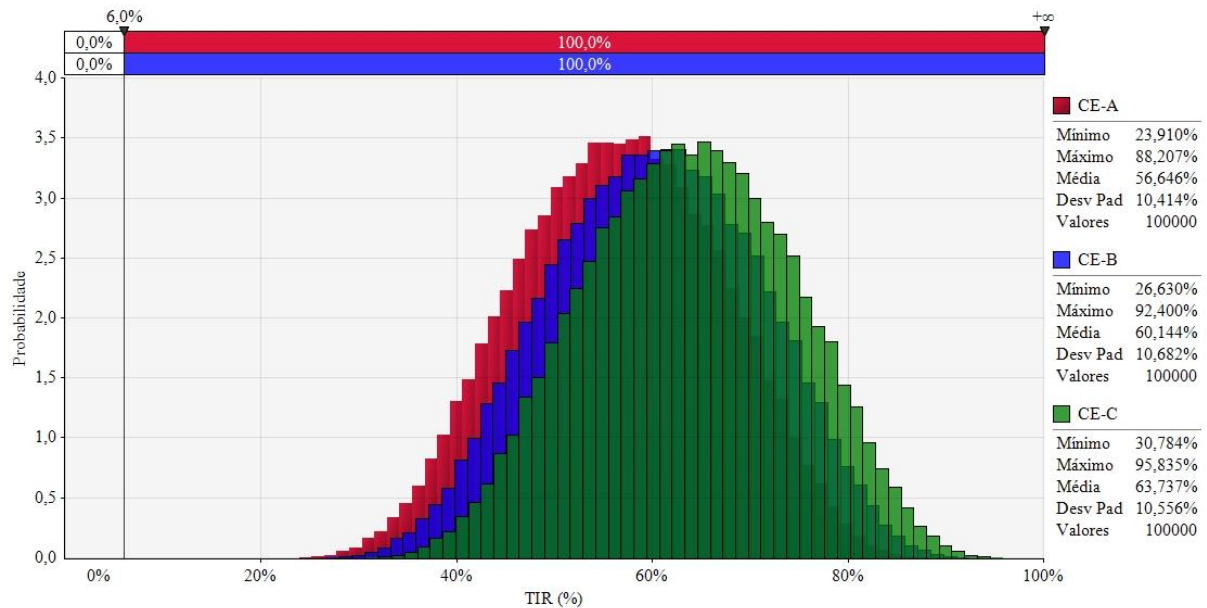
Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Pela Figura 14 é possível observar que o preço de venda do cavaco de madeira foi a variável com maior impacto no VPL, apresentando variação de  $\pm$  R\$ 2.793.762,37 para o cenário mais favorável (CE-C) e para o cenário mais desfavorável (CE-A). A segunda variável com maior impacto foi a taxa de desconto do projeto, simulada de 0% a 12%, conforme uma possível variação de mercado, com base no histórico de taxas para o Brasil. Essa, no entanto, não foi considerada com diferentes valores para as demais simulações, visto que não é uma variável controlável e já foi estabelecida acima das taxas atuais. O preço de compra do cavaco não apresentou sensibilidade tão forte quanto o preço de venda, variando em  $\pm$  R\$ 999.505,18. O consumo energético foi a variável menos representativa de sensibilidade para o projeto, com  $\pm$  R\$ 63.173,13.

### 3.3.3 Análise de risco

Uma simulação de Monte Carlo com 100 mil interações, seguindo uma distribuição PERT, foi executada para os três cenários energéticos de secagem do cavaco de madeira. As simulações realizadas para a TIR podem ser visualizadas na Figura 15 e para o VPL na Figura 16.

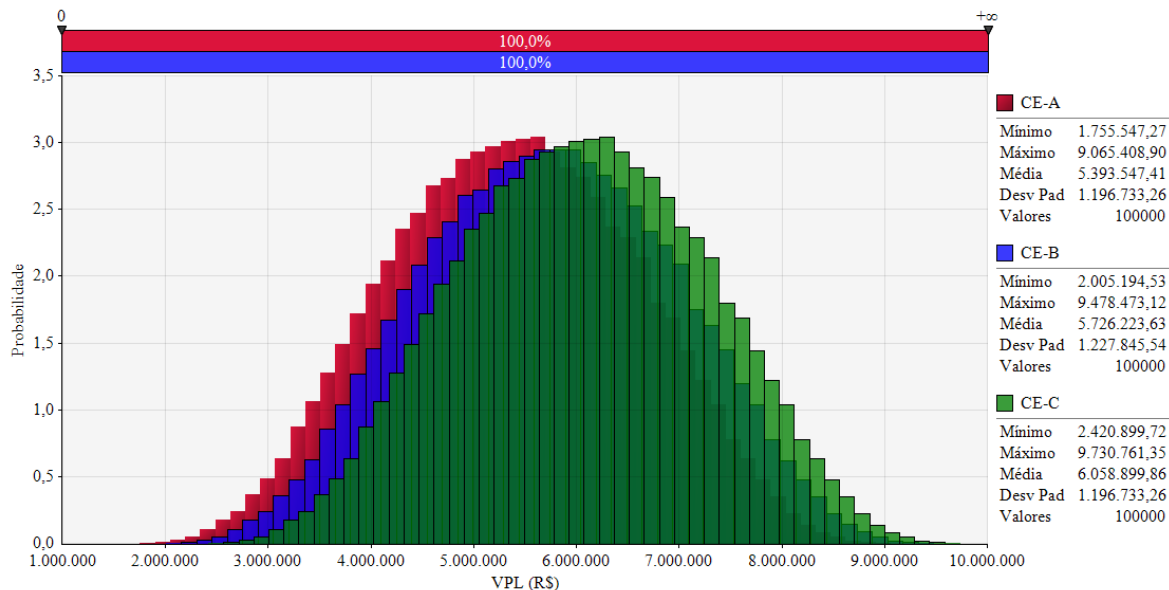
Figura 15 - Taxa interna de retorno da análise de risco do projeto para os três cenários energéticos.



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Percebe-se na Figura 15, que quanto maior o consumo energético durante o processo de secagem, menor é a TIR. O menor valor encontrado para a TIR foi de 23,91% e pertence ao CE A, cenário do maior consumo energético para a secagem do cavaco de madeira. O maior valor para a TIR foi de 95,83% e pertence ao CE-C, cenário de menor consumo energético para a secagem do cavaco de madeira. Visualiza-se que para todos os cenários, o investimento é economicamente atrativo, visto que 100% dos resultados estão acima da TMA, ou seja, ausência de risco.

Figura 16 - Valor presente Líquido da análise de risco do projeto para os três cenários energéticos.



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Conforme pode ser observado na Figura 16, o VPL assume valores maiores conforme o cenário torna-se mais favorável. O CE-A é o cenário com o maior consumo energético, e pior condição, tendo um VPL de pelo menos R\$ 1.755.547,27. O CE-C demonstra-se como o melhor cenário para escolha de investimentos, com no mínimo R\$ 2.420.899,72. No CE-C tem-se os menores custos de consumo energético para a secagem, bem como, o menor consumo de serragem para a secagem.

### 3.4 DISCUSSÃO

Este trabalho permitiu analisar a viabilidade econômica de um projeto industrial de secagem de cavaco de madeira. Considerou-se, para isso, a utilização de ferramentas de análise econômico-financeira, como indicadores de viabilidade, análises de sensibilidade e análise de risco. A partir de um cenário base de estudo, também foram elaborados dois outros cenários, um mais favorável e outro menos favorável, em termos financeiros ao projeto.

Percebeu-se que a viabilidade do projeto é bastante alta, o que pode ser evidenciado devido a expressiva diferença entre o preço de compra e de venda do cavaco de madeira e a relação do baixo gasto para a secagem dele. A viabilidade do projeto apresenta uma taxa elevada quando comparada a outros projetos, como por exemplo, Ribeiro (2018) constatou em seu estudo que a partir de uma taxa de desconto de 17,5% seu projeto de produção de energia termelétrica a partir de biomassa florestal torna-se inviável. Seo et al. (2017) verificaram que



quando o preço base da biomassa aumentou 90%, o VPL diminuiu em 2 milhões e a TIR de 20% para 0,3%.

Em consonância aos resultados encontrados neste trabalho, Almeida (2016) constatou em seu estudo que a variável preço de venda da biomassa foi um dos fatores que mais influenciou no VPL. Pereira et al. (2018) constataram que o VPL sofreu maior influência com o preço de venda da madeira e menor influência pelo custo do seguro florestal. No caso de Cardoso, Silva e Eusébio (2019) consideraram dois cenários de variação para o projeto, com  $\pm 10\%$  sobre o investimento inicial. Nele, obtiveram uma TIR de 8,66% para o projeto, uma perspectiva positiva mas relativamente baixa, na qual, o custo da biomassa representou os menores impactos sobre o VPL. Todavia, o preço de venda da eletricidade gerada com a biomassa foi o que mais impactou no VPL do projeto.

Almeida (2016), verificou que a viabilidade econômica de um sistema mecanizado para o aproveitamento de tocos de madeira tem VPL de 8,6 milhões, um *payback* de 2 anos e uma TIR de 48%. Conforme Gitman (2010) quanto menor o for o tempo de *payback*, menor será a exposição do projeto ao risco. Assim, verifica-se por meio dos resultados encontrados neste trabalho, que o risco associado ao projeto simulado é baixo, tendo em vista o curto período de retorno do investimento de 1,63 anos.

Em conformidade, Assis et al. (2017) utilizaram a simulação de Monte Carlo para calcular os custos de colheita e transporte de resíduos de madeira, avaliando custo de compra e venda, no qual denotam que o investimento de capital e o custo da matéria prima foram os principais fatores influenciadores do custo, para todos os cenários. Nessa perspectiva, considerando que a biomassa apresenta baixo valor de compra e alto valor de venda, conforme o cenário base do estudo, assume-se que o preço da biomassa é o principal agente influenciador do desempenho econômico do projeto.

Vale ressaltar, que indicadores de viabilidade econômica são acordados conforme sua elasticidade, podendo assim testar o comportamento do projeto sob cenários estressantes (CARDOSO; SILVA e EUSÉBIO, 2018). Severis et al. (2019) destacam que a utilização de metodologias de análise econômica e de risco podem ser aplicadas em diversos estudos e podendo também, ser combinada com variáveis sociais e ambientais.

### 3.5 CONCLUSÃO

O presente trabalho objetivou realizar uma avaliação da viabilidade econômica de um empreendimento que realiza a secagem de cavaco de madeira, por meio de um secador rotativo,

para geração de energia térmica. Ademais, verificou-se os riscos associados a esse tipo de investimento, de modo a apresentar instrumentos de análise que permitem subsidiar a tomada de decisão sob condições de incerteza. Foram considerados três cenários de consumo energético para a secagem do cavaco e avaliado o impacto de diferentes níveis de preço de aquisição e de comercialização do cavaco de madeira.

Verificou-se por meio dos indicadores econômicos que o empreendimento para secagem de cavaco de madeira apresenta alta viabilidade econômica, visto que obteve-se um VPL de R\$ 5.726.223,68, TIR de 60,23%, *payback* descontado de 1,63 anos e Relação Benefício Custo de 1,39. Por meio da análise de sensibilidade da TIR e do VPL, considerando diferentes preços de compra e venda do cavaco de madeira, denotou-se que das 120 interações realizadas, 100% apresentaram-se com valores positivos, reforçando a constatação de viabilidade econômica do projeto. Dentre as variáveis estudadas no projeto, o preço de venda do cavaco de madeira foi a que mais apresentou sensibilidade, seguida da taxa de desconto e do preço de compra do cavaco de madeira.

A simulação de Monte Carlo mostrou que quanto menor o consumo energético durante a secagem, maior é a TIR do projeto, sendo que o menor valor encontrado para ela foi de 23,91% e corresponde ao CE-A, cenário de maior consumo energético para a secagem do cavaco de madeira. Quanto ao VPL, todos os cenários mostraram-se economicamente viáveis, principalmente para o cenário de menor consumo energético CE-C.

Esta pesquisa aponta por meio de diversas análises a viabilidade econômica de um projeto de secagem de cavaco de madeira com secador rotativo, e contribui para que indústrias consumidoras deste combustível possam avaliar a possibilidade de implantação de um sistema de secagem da biomassa.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Bruno Oliveira de. **Viabilidade do aproveitamento de resíduos florestais**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2016.

ASSIS, C. A. de. et al. Conversion Economics of Forest Biomaterials: Risk and Financial Analysis of CNC Manufacturing. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, n. 4, p.682-700, 14 jun. 2017.

BAUER, J. M.; SELLITTO, M. A. Estímulos e barreiras para o aproveitamento de resíduos de madeira na fabricação de briquetes: estudo de casos. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 4, p.1267-1289, 30 set. 2019.

EVISON, D. C. Estimating annual investment returns from forestry and agriculture in New Zealand. **Journal of forest economics**, v. 33, p.105-111, dez. 2018.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKE, B. H. **Análise de investimentos**: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial. São Paulo: Atlas, 2010.

CARDOSO, J.; SILVA, V.; EUSÉBIO, D. Techno-economic analysis of a biomass gasification power plant dealing with forestry residues blends for electricity production in Portugal. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, n. 2019, p. 741–753, 2019.

CHING, H. Y.; MARQUES, F.; PRADO, L. **Contabilidade e finanças para não especialistas**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 342 p.

DEBONI, T. L. et al. Models for estimating the price of forest biomass used as an energy source: A Brazilian case. **Energy Policy**, v. 127, p.382-391, abr. 2019.

FURTADO, T. S. et al. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para geração de energia em Lages, SC. **Ciência Florestal**, Santa Maria , v. 22, n. 4, p. 795-802, Dez. 2012.

GITMAN, Lawrence J.. **Princípios de Administração Financeira**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 775 p.

HERNÁNDEZ, U. F.; JAEGER, D.; SAMPERIO, J. I. Evaluating economic alternatives for wood energy supply based on stochastic simulation. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 4, p. 1–19, 2018.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. BRASIL. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura - PEVS**. 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?edicao=25472&t=destaques>>. Acesso em: 25 ago. 2019.

JANOSELLI, H. R. D.; HARBS, R.; MENDES, F. L. Viabilidade econômica da produção de eucalipto no interior de São Paulo. **Revista Ipecege**, v. 2, n. 2, p.24-45, 24 maio 2016.

KUHN, Ivo Ney. **Gestão financeira**. Ijuí: Unijuí, 2012. 126 p.

KUPPENS, T. et al. Combining Monte Carlo simulations and experimental design for incorporating risk and uncertainty in investment decisions for cleantech: a fast pyrolysis case study. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 6, p. 1195–1206, 2018.

KLUCZKOWSKI, A. The use of wood biomass in the regional system of renewable energy sources as a chance for the region. **Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University**, v. 4, n. 3–4, p. 67–73, 2018.

LOPES, G. de A.; BRITO, J. O.; MOURA, L. F. de. Uso energético de resíduos madeireiros na produção de cerâmicas no estado de São Paulo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 679-686, Jun. 2016.

NIKODINOSKA, N. et al. Sustainability metrics for renewable energy production: Analysis of biomass-based energy plants in Italy. **Journal Of Renewable And Sustainable Energy**, v. 10, n. 4, p.1-13, jul. 2018.

PAOLOTTI, L. et al. Economic and environmental assessment of agro-energy wood biomass supply chains. **Biomass And Bioenergy**, v. 97, p.172-185, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.020>.

PRATES, G. A.; SCHAITZA, E. G. Wood gasification energy micro-generation system in Brazil- a Monte Carlo viability simulation. **Independent Journal of Management & Production**, v. 9, n. 1, p. 140, 2018.

PEREIRA, R. S. et al. Cost of forest insurance in the economic viability of eucalyptus plants. **Revista Árvore**, FapUNIFESP (SciELO), v. 42, n. 3, p.1-9, 13 set. 2018.

RIBEIRO, G. B. de D. **Análise técnica e econômica da produção de energia termelétrica a partir da biomassa florestal**. 2018. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós- Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

SAMANEZ, Carlos P. **Engenharia econômica**. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 221 p. 2009.

SEO, Y. et al. Economic analysis of a small-sized combined heat and power plant using forest biomass in the Republic of Korea. **Forest Science and Technology**, v. 13, n. 3, p.116-125, 3 jul. 2017.

SEVERIS, R. M. et al. Economic analysis and risk-based assessment of the financial losses of domestic rainwater harvesting systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, n. March, p. 206–217, 2019.

SIMIONI, F. J. et al. Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 731–742, 2017.

SUTTLES, S. A. et al. Economic effects of bioenergy policy in the United States and Europe: A general equilibrium approach focusing on forest biomass. **Renewable Energy**, v. 69, p. 428–436, 2014.

SHAH, A. et al. Techno-economic analysis of a production-scale torrefaction system for cellulosic biomass upgrading. **Biofuels, Bioproducts And Biorefining**, v. 6, n. 1, p.45-57, 14 out. 2011.

#### 4 IMPACTO AMBIENTAL DA DIMINUIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE CAVACO DE MADEIRA EM SECADOR ROTATIVO

**RESUMO:** Os impactos ambientais causados pela utilização de biomassa florestal têm sido cada vez mais considerados, tendo em vista o seu crescente uso como gerador de energia térmica. O presente estudo teve como objetivo avaliar o impacto ambiental causado pela utilização do cavaco de madeira para a obtenção de 1 MJ de energia térmica sob diferentes Teores de Umidade (TU) e três cenários de consumo energético durante a secagem industrial. Foram coletados dados em uma empresa que realiza o processo de secagem da biomassa, servindo para compor o cenário base (CE-B) do estudo. A partir do cenário base, foi elaborado um cenário com um acréscimo de 25% e outro cenário com um decréscimo de 25% no consumo energético durante o processo de secagem industrial. Foram considerados oito TU diferentes para o cavaco úmido, e cinco TU diferentes para o cavaco seco, ambos para os três cenários energéticos, totalizando 120 simulações. Os dados foram computados no software *Excel* e posteriormente inseridos no programa computacional *SimaPro*, para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Utilizou-se a base de dados *Ecoinvent* e o *ReCiPe midpoint* e *endpoint* como método de avaliação. Os resultados indicam que o cavaco úmido apresentou impacto ambiental maior do que o cavaco seco, tanto para as categorias de ponto médio como para as categorias de ponto final. Constatou-se, com o estudo, que quanto maior o TU do cavaco, maior também é o impacto ambiental causado, principalmente devido a relação inversamente proporcional entre TU e Poder Calorífico Líquido (PCL). Assim, denota-se que o processo de secagem industrial, apesar de gerar alguns impactos ambientais, ainda torna a utilização do cavaco de madeira, para obtenção de energia térmica, menos impactante ao meio ambiente, quando comparado ao cavaco úmido.

**Palavras chave:** Avaliação do Ciclo de Vida, Biomassa Florestal, Silvicultura.

**ABSTRACT:** The environmental impacts caused by the use of forest biomass have been increasingly considered in view of its increasing use as a thermal energy generator. The present study aimed at evaluating the environmental impact caused by the use of wood chips to obtain 1 MJ of thermal energy under different Moisture Levels (TU) and three scenarios of energy consumption during industrial drying. Data were collected from a company that carries out the biomass drying process, serving to compose the base scenario (CE-B) of the study. Based on the baseline scenario, one scenario was elaborated with a 25% increase and another scenario with a 25% decrease in energy consumption during the industrial drying process. It was considered eight different TU for wet chips and five different TU for dry chips, both for the three energy scenarios, totaling 120 simulations. The data were computed in Excel software and later inserted in the SimaPro computer program to perform the Life Cycle Assessment (LCA). The Ecoinvent database and the ReCiPe midpoint and endpoint were used as the evaluation method. The results indicate that wet chip had a higher environmental impact than dry chip, both for midpoint and endpoint categories. The study found that the higher the TU of the chip, the higher is the environmental impact caused, mainly due to the inversely proportional relationship between TU and Net Calorific Power (LWP). Thus, it can be seen that the industrial drying process, despite generating some environmental impacts, still makes the use of wood chips, to obtain thermal energy, less impacting on the environment, when compared to wet chips.

**Keywords:** Life Cycle Assessment, Forest Biomass, Forestry.

## 4.1 INTRODUÇÃO

A participação das energias renováveis na geração de energia vêm crescendo aproximadamente 3,9% ao ano no mundo (IEA, 2019). Nesse contexto, Verma et al. (2017) denotam que a energia pode ser considerada como uma mercadoria estratégica para os países, porém, incertezas sobre o seu suprimento podem afetar, principalmente, a economia de países em desenvolvimento. Nesse cenário, o uso da biomassa florestal tem conquistado interesse mundial, pois representa uma forma de atender as demandas de geração de energia e calor (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2014). Como um dos países em desenvolvimento, o Brasil apresenta quase 8 milhões de hectares de florestas plantadas, o que equivale a 1,7 bilhão de toneladas de CO<sub>2</sub>eq estocados (IBÁ, 2018). Em 2016 o setor representou 6,2% do PIB industrial do Brasil, evidenciando o grande potencial de contribuição para uma economia verde (IBÁ, 2017).

A utilização da madeira no Brasil dá-se em várias aplicações industriais, destacando-se dentre as cultivares o *pinus*, o qual tem grande relevância econômica no setor de base florestal (FERRO et al., 2018). Ainda, o país é um grande fornecedor de produtos à base de madeira como, celulose, biomassa energética, móveis, painéis, entre outros (SILVA et al., 2015). Na indústria, 66% dos resíduos madeireiros são queimados em caldeiras para geração de energia térmica, vapor e, energia elétrica em seu processo produtivo, eliminando a utilização de combustíveis fósseis (IBÁ, 2017).

Silva et al. (2020) apontam que o cavaco está entre os principais coprodutos e resíduos de base florestal gerados na região de Lages-SC, provenientes de quatro ramos de atuação da indústria. Ainda, os autores denotam que existe um fluxo circular no setor de base florestal na região de Lages, em que é possível verificar o aproveitamento dos coprodutos e resíduos sobretudo para uso energético.

As características físicas e químicas da biomassa são capazes de interferir em sua capacidade energética e também, na emissão de gases e particulados durante a combustão. Geralmente, o TU de aparas de madeira tende a ficar entre 50% a 55%, em base seca (PADILLA-RIVERA et al., 2017) e de 55% para o cavaco industrial recém gerado (DEBONI et al., 2019). Sua densidade energética pode ser melhorada através da preparação do material, como a redução de tamanho, secagem, peletização, briquetagem e torrefação (IEA, 2017).

No que tange ao procedimento de secagem da biomassa, resulta em maior poder calorífico e também reduz os impactos ambientais na conversão de biomassa em energia térmica (PANG; MUJUMDAR, 2010). Somado a isto, Deboni et al. (2019) obtiveram o

impacto econométrico sobre o PCL quando reduzido o TU do cavaco industrial, sendo que, o cavaco seco apresentou maior valor de comercialização, além de ser mais rentável energeticamente.

Existem muitas tecnologias de secagem de biomassa florestal. Conforme Verma et al. (2017), antes da co-incineração a biomassa apresenta um elevado TU, que deve ser reduzido antes de sua combustão para o aumento de sua eficiência. Ainda, benefícios ambientais também foram verificados com a queima de biomassa seca, como a redução de material particulado, dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre.

Durante a secagem da biomassa observam-se três principais emissões: partículas finas arrastadas, vaporização de componentes orgânicos e degradação térmica da biomassa. A emissão de compostos orgânicos voláteis é maior tanto quanto maior for a temperatura do secador rotativo, porém, as emissões podem sofrer influência de alguns fatores, como características da biomassa, tipo de secador e características do sistema de secagem. Comumente são utilizados ciclones, filtros, e filtros de manga para o controle de emissões de partículas (PANG; MUJUMDAR, 2010).

Brand e Giesel (2017), observaram que o secador rotativo proporcionou uma redução de 9,5% no TU da madeira utilizada para gerar energia, o que aumentou o poder calorífico e contribuiu para a diminuição do consumo de combustíveis auxiliares. No entanto, percebem-se alguns problemas na secagem de biomassa, incluindo a eficiência energética, emissões e custos, sendo necessário selecionar um sistema adequado para alcançar o TU desejado (PANG, MUJUMDAR, 2010).

Nesta conjuntura, a preparação da biomassa como fonte de energia térmica tem sido fomento do desenvolvimento de pesquisas para quantificar os impactos ambientais associados à utilização da madeira para a geração de energia, sendo a avaliação do ciclo de vida (ACV) uma das ferramentas mais utilizadas nestes estudos ambientais. A ACV é uma técnica que serve para a avaliação de aspectos e impactos potenciais associados a um determinado produto ao longo de sua vida, contribuindo para a identificação de oportunidades de melhorias, tomadas de decisões, seleção de indicadores e como ferramenta de marketing ambiental (ABNT, 2014).

Evidencia-se que há uma variedade de estudos sobre os impactos ambientais da utilização de biomassa florestal por meio da avaliação do ciclo de vida (ZELM et al., 2014; PEREIRA, NICOLAU e BAZZO, 2018; FERRO et al., 2018; PADILLA-RIVERA et al., 2017) porém, não foram localizados estudos que associem o impacto ambiental da qualidade de cavacos de madeira com o processo de secagem industrial, por meio de secador rotativo, se é uma atividade que apresenta-se ambientalmente favorável. Deste modo, este estudo teve como

objetivo avaliar o impacto ambiental causado pela utilização do cavaco de madeira para a obtenção de 1 MJ de energia térmica sob diferentes TU e consumos energéticos durante a secagem industrial.

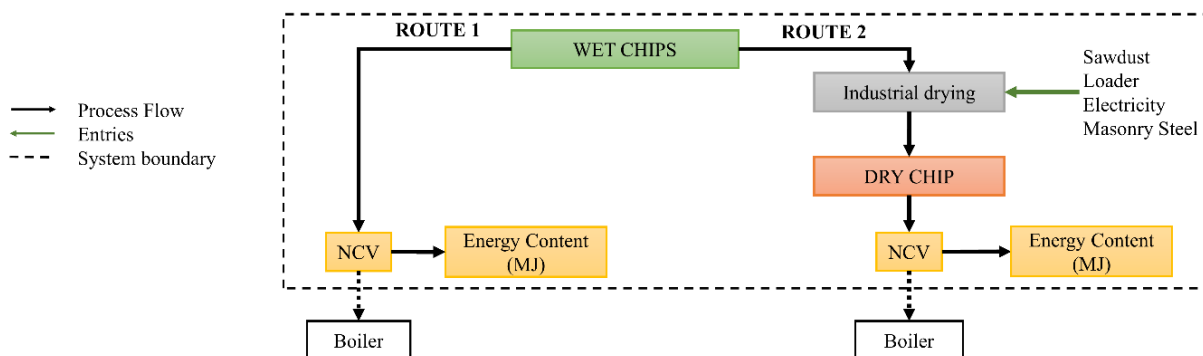
## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia de avaliação do impacto ambiental causado pelo cavaco de madeira em suas ROTAS de utilização foi estruturada de modo que, primeiramente, apresenta-se a definição das rotas, fronteira de estudo do sistema e cenários energéticos. Na sequência, apresenta-se o local de estudo e coleta de dados, e por último, os procedimentos de ACV.

### 4.2.1 Definição das rotas tecnológicas, fronteira do sistema e cenários energéticos

Neste estudo, foram adotadas duas rotas tecnológicas de uso do cavaco de madeira, denominadas como rota 1 e rota 2 (Figura 17). A rota 1 compreende o fluxo de processos físicos do cavaco de madeira para uso energético com TU natural, de aproximadamente 55%, ou seja, sem passar por qualquer tipo de tratamento que altere as suas características. A rota 2 corresponde ao processo de redução do TU de cavaco de madeira através da utilização de um secador rotativo. As rotas são utilizadas para fins de comparação entre os processos visando indicar qual deles é ambientalmente menos impactante.

Figura 17 - Rotas tecnológicas e fronteira do sistema do estudo de ACV do cavaco de madeira.



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

O cavaco de madeira com TU natural é denominado aqui como “cavaco úmido”, e o cavaco de madeira com TU reduzido é denominado aqui como “cavaco seco”. Para a análise de ACV, além da definição das rotas de estudo, é necessária também definir a fronteira do sistema,



ou seja, a delimitação dos componentes que fazem parte da análise ambiental que será realizada em cada rota tecnológica.

A rota 1 se refere a utilização direta de cavaco de madeira, recém gerado pela indústria. As emissões de particulados, gases e a geração de cinzas durante a produção de energia térmica pela indústria consumidora não foram considerados neste estudo. As entradas da rota 1 contabilizam apenas os processos inseridos no *dataset* correspondente ao cavaco de madeira. O *dataset* do cavaco de madeira inclui dados desde a silvicultura da madeira até sua transformação em cavaco, sendo considerado um produto.

A rota 2 é a utilização do cavaco de madeira após o tratamento (secagem) de melhoria da sua qualidade como combustível via secador rotativo. Durante a secagem ocorre a entrada de energias que são consumidas pelo secador, que compreendem a eletricidade e a serragem. Por tratar-se de uma secagem industrial também foi considerada uma carregadeira durante a operação, para movimentação do material. A secagem do cavaco demanda um local com uma estrutura de alvenaria e equipamentos constituídos de aço, logo, também foram considerados estes dois componentes no inventário do ciclo de vida (ICV).

Além da definição das duas rotas tecnológicas de uso do cavaco de madeira, também foram propostos mais dois cenários de consumo energético durante a secagem do cavaco de madeira. O consumo energético é correspondente a utilização da serragem que alimenta a fornalha do secador rotativo, além da eletricidade utilizada pelos equipamentos que constituem todo o sistema de secagem. A partir do cenário energético base (CE-B), definiu-se um cenário de maior consumo e outro de menor consumo energético durante a secagem, considerando um acréscimo (CE-A) e um decréscimo (CE-C) de 25%, respectivamente.

#### **4.2.2 Local do estudo e coleta de dados**

Os dados correspondentes ao processo da secagem de cavaco de madeira foram coletados em uma indústria da região serrana do estado de Santa Catarina, a qual realiza a secagem industrial de cavaco de madeira por meio de um secador rotativo, e o vende como combustível para indústrias que o utilizam na geração de energia térmica.

A região serrana do estado de Santa Catarina apresenta grande fluxo de biomassa florestal, bem como, indústrias que utilizam a biomassa como combustível em seus processos. De acordo com Simioni (2017), as regiões Sul e Sudeste do Brasil concentram os maiores produtores de lenha do país. Ainda, conforme Wahrlich e Simioni (2019), a região de Lages é considerada um polo da indústria de base florestal, com características de um ecossistema

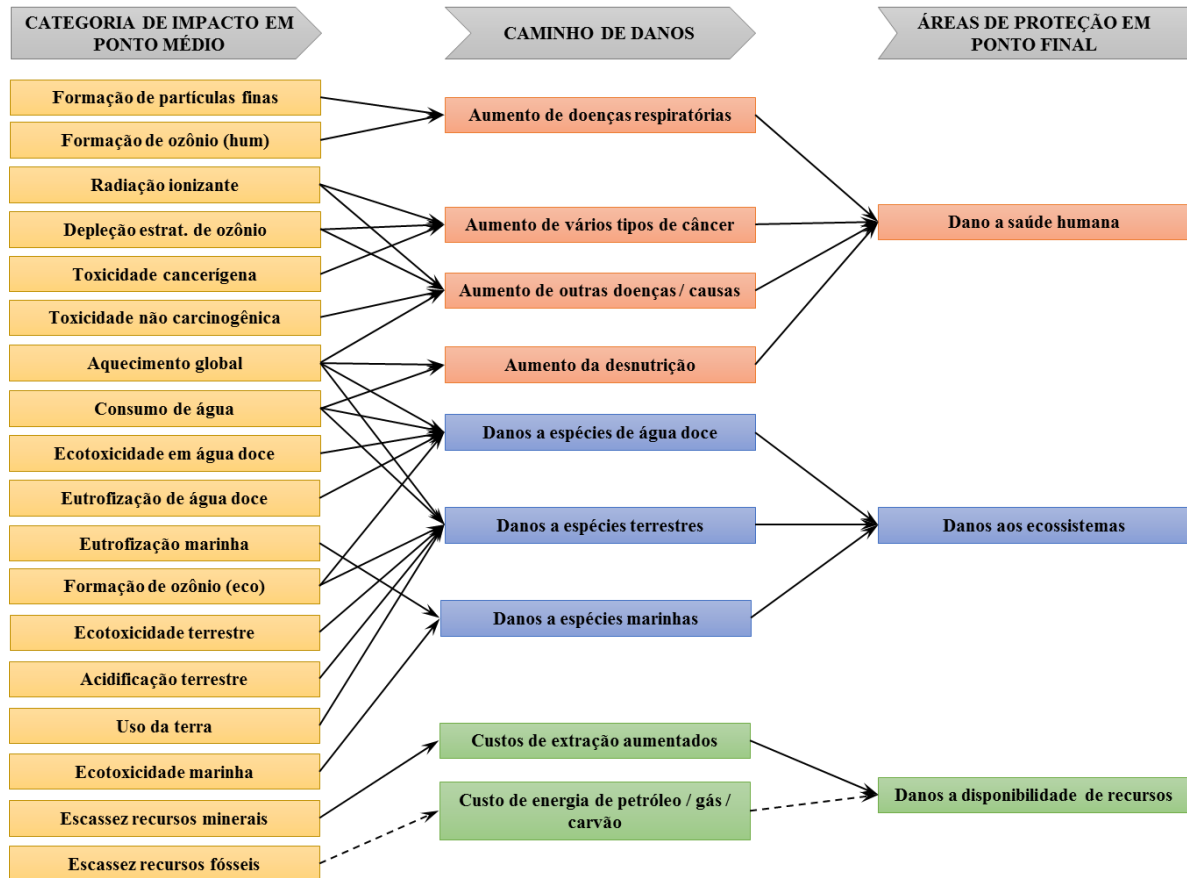
industrial. Como resultado da intensa relação de simbiose, aproveitamento dos coprodutos e resíduos das indústrias são, prioritariamente, para finalidades energéticas (91,3%) (Silva et al., 2020).

Os dados sobre os parâmetros de qualidade do cavaco de madeira foram obtidos de uma série histórica de análises realizadas por uma empresa da região, a qual utiliza diversos resíduos florestais para a geração de energia. Porém, para esta pesquisa selecionou-se apenas os dados correspondentes ao cavaco de madeira, referentes as médias do PCL, TU e TC. Tais parâmetros, são apresentados por Deboni et al. (2019), em que o cavaco industrial contém TU médio de 55,27%, TC na ordem de 1,03% e PCL de 1699,96 kcal.kg<sup>-1</sup>.

#### 4.2.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida

O impacto ambiental causado pela utilização de cavaco de madeira, com TU natural de 55%, ou, com TU de 40% após sistema de secagem industrial, foi analisado por meio da abordagem de uma ACV de produto, conforme norma estabelecida pela ISO 14040. Para tal, utilizou-se o programa computacional *SimaPro* versão 9 (PRÉ CONSULTANTS, 2019) e para o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) utilizou-se a base de dados *Ecoinvent*. O método empregado para a avaliação com os três cenários energéticos para TU de 55% antes da secagem e 40% após a secagem foi o *ReCiPe midpoint*, e, para as 120 simulações dos três cenários energéticos foi o *ReCiPe endpoint*. Conforme o Instituto Nacional de Saúde Pública e Meio Ambiente, em sua publicação sobre o *ReCiPe 2016*, essa metodologia classifica os impactos ambientais em 18 categorias de ponto médio (*midpoint*) e três categorias finais (*endpoint*), Saúde Humana (*Daly*), Ecossistemas (*species.yr*) e Recursos Naturais (*USD 2013*) (Figura 18).

Figura 18 - Categorias de impacto ReCiPe *midpoint* e *endpoint*.



Fonte: Adaptado de Instituto Nacional de Saúde Pública e Meio Ambiente, ReCiPe 2016.

Para o inventário do ciclo de vida (ICV) do cavaco seco, inicialmente foi realizado um levantamento de todas as entradas competentes ao processo de secagem do CE-B (cenário base), conforme apresentado na Tabela 16. A partir do cenário base de estudo, também foram calculadas as quantidades para o cenário de menor consumo (CE-C) e para o cenário de maior consumo (CE-A). Similarmente, foram calculadas as quantidades de cavaco conforme o TU da biomassa, ou seja, conforme sua massa.

Tabela 6 - Quantidades das entradas calculadas e inseridas nos *datasets* para a configuração de cálculo no *SimaPro*.

ENTRADAS	UNIDADE	CAVACO ÚMIDO	CAVACO SECO		
			CE A	CE B	CE C
Eletricidade	kWh/Mj	-	1,97E-03	1,58E-03	1,18E-03
Serragem	kg/Mj	-	1,05E-02	8,44E-03	6,33E-03
Tijolos	kg/Mj	-	2,18E-06	2,18E-06	2,18E-06
Horas de trabalho da carregadeira	h/Mj	-	1,57E-05	1,57E-05	1,57E-05
Aço das máquinas	kg/Mj	-	2,15E-05	2,15E-05	2,15E-05
Cavaco úmido 51%	kg/Mj	1,25E-01	-	-	-
Cavaco úmido 53%	kg/Mj	1,32E-01	-	-	-
Cavaco úmido 55%	kg/Mj	1,39E-01	-	-	-
Cavaco úmido 57%	kg/Mj	1,48E-01	-	-	-
Cavaco úmido 59%	kg/Mj	1,58E-01	-	-	-
Cavaco úmido 61%	kg/Mj	1,70E-01	-	-	-
Cavaco úmido 63%	kg/Mj	1,83E-01	-	-	-
Cavaco úmido 65%	kg/Mj	1,99E-01	-	-	-
Cavaco Seco 36%	kg/Mj	-	8,88E-02	8,88E-02	8,88E-02
Cavaco Seco 38%	kg/Mj	-	9,24E-02	9,24E-02	9,24E-02
Cavaco Seco 40%	kg/Mj	-	9,62E-02	9,62E-02	9,62E-02
Cavaco Seco 42%	kg/Mj	-	1,00E-01	1,00E-01	1,00E-01
Cavaco Seco 44%	kg/Mj	-	1,05E-01	1,05E-01	1,05E-01

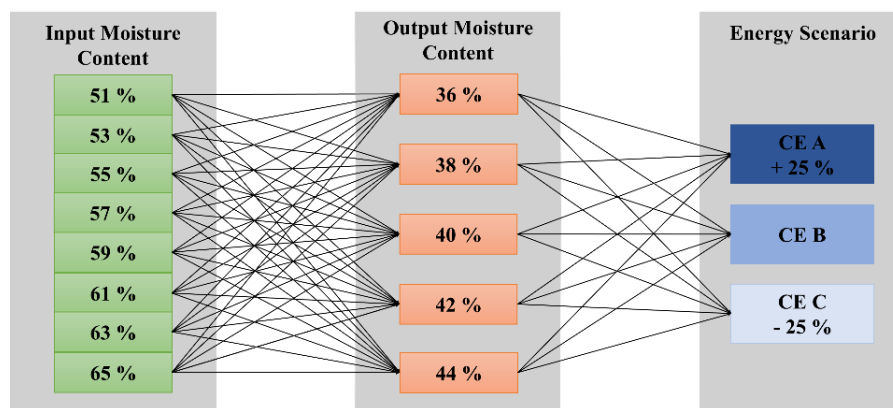
Fonte: Elaborada pela autora.

Cada componente do ICV, denominados como *datasets* que são inseridos no *SimaPro*, foram considerados a quantidade equivalente para a geração de 1 MJ de energia térmica por meio do cavaco seco. Assim, a unidade funcional definida neste trabalho foi a geração de 1 MJ de energia térmica. A eletricidade e a serragem consumidas pela fornalha são as únicas entradas do ICV que se alteram conforme o cenário energético, visto que foram propostos dois cenários adicionais de consumo energético durante a secagem. Os tijolos da construção do empreendimento de secagem do cavaco e o aço das máquinas, foram distribuídos ao longo da vida útil do projeto, ou seja, em 15 anos de operação da indústria e, posteriormente, calculadas as quantidades para a geração de 1 MJ de energia térmica, de acordo com o CE-B. Consequentemente, apresentam o mesmo valor para os três cenários energéticos. As horas de trabalho da carregadeira são calculadas conforme a quantidade de cavaco movimentada, considerando que os três cenários representam a entrada de cavaco úmido a 55% e saída de cavaco seco a 40%.

Com os três cenários energéticos propostos neste estudo, foi possível criar simulações do processo de secagem. Considerando as informações sobre TU do cavaco de madeira disponibilizados pela empresa consultada e dados publicados na literatura, estabeleceu-se variações do TU do cavaco úmido e do cavaco seco. Adotou-se, para o cavaco úmido os valores de 51%, 53%, 55%, 57%, 59%, 61%, 63% e 65%. Para o cavaco seco foram adotados os níveis

de 36%, 38%, 40%, 42% e 44%. Definiram-se mais níveis para o cavaco úmido tendo em vista que não é um parâmetro possível de ser controlado pela indústria que realiza a secagem, enquanto os níveis de TU do cavaco seco no secador podem ser regulados conforme a necessidade da indústria que faz a secagem. Com isso, foi possível a realização de 120 simulações, entre os TU de entrada e TU de saída do cavaco de madeira, para cada um dos três cenários energéticos, conforme é possível visualizar na Figura 19.

Figura 19 - Configuração de cálculo das interações entre os teores de umidade e os cenários energéticos.



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Cada TU estabelecido para o cavaco de madeira está relacionado a uma massa específica, visto que, quanto maior o TU adotado, maior também é a massa do cavaco, devido a proporção de água contida nele, o que reduz seu PCL. Estabeleceu-se que todas as informações utilizadas para fins de ACV no programa *SimaPro* seriam mensuradas para a geração de 1 MJ de energia por meio do cavaco seco a 40% de TU (CE-B), logo, para os maiores TU foram obtidas maiores massas, enquanto que, para os menores TU foram obtidas massas menores.

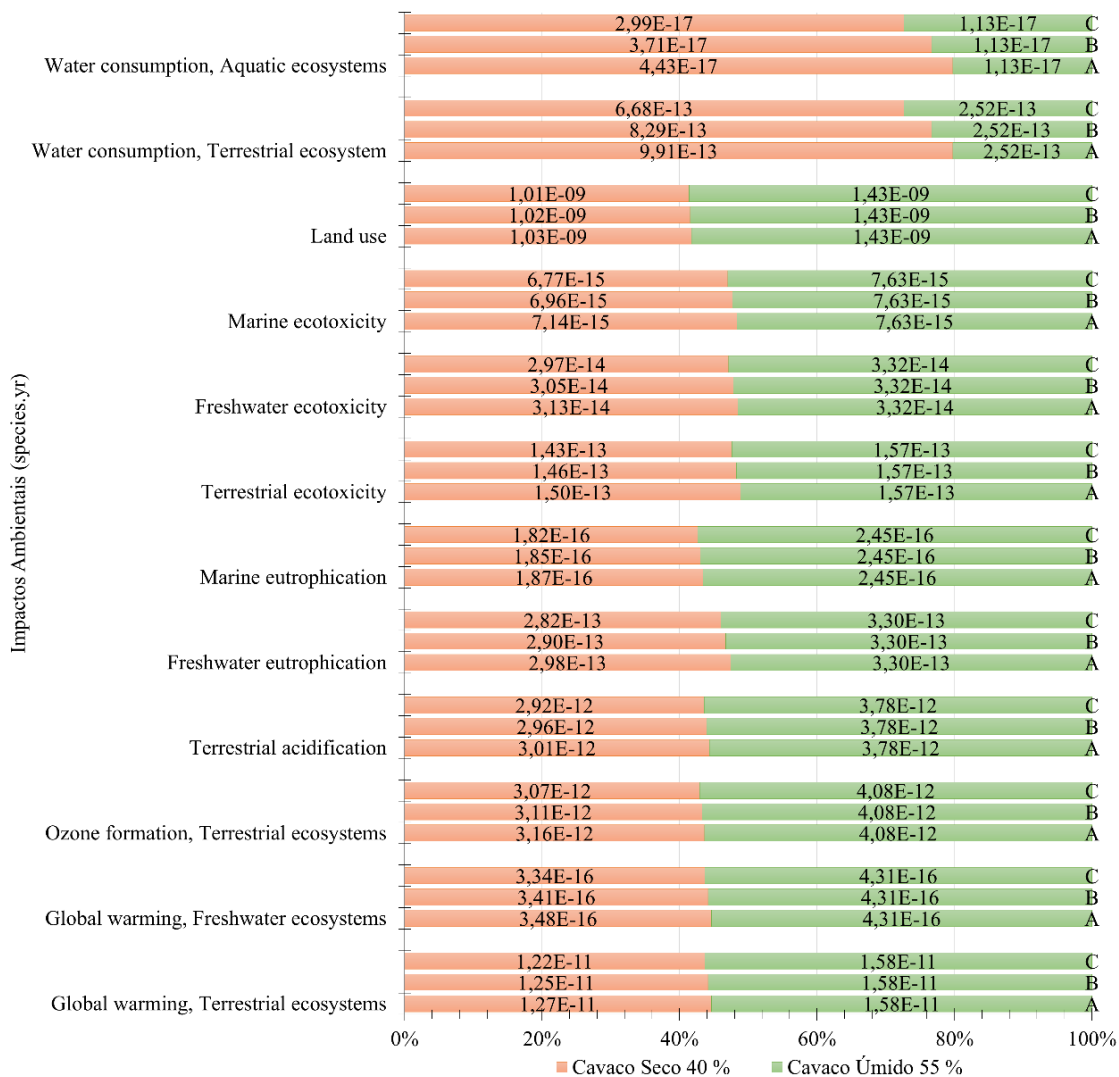
#### 4.3 RESULTADOS

Os resultados da AICV estão apresentados em dois subitens, primeiro com a relação dos impactos em ponto médio (*midpoint*) para os três cenários energéticos e 55% de TU sem a secagem e 40% de TU de saída do cavaco do secador. Posteriormente, são apresentados os resultados dos impactos em ponto final (*endpoint*) para as simulações dos diferentes TU para cada um dos três cenários energéticos.

### 4.3.1 Impacto ambiental em ponto médio

O método utilizado pelo programa computacional *SimaPro* classificou os impactos ambientais em 22 categorias de ponto médio, separando com mais detalhes algumas das 18 categorias principais do método. Cada categoria foi agregada conforme a unidade de medida utilizada pelo método *ReCiPe*: *species.yr*, *daly* ou *USD2013*. Na Figura 4, visualiza-se o impacto ambiental em ponto médio (*midpoint*) para cada um dos três cenários energéticos, considerando o cavaco com TU de 55% sem secagem, e 40% após a secagem. Figura-se, pelos resultados, que os maiores impactos no ecossistema são causados pelo cavaco úmido, em 58,4% de todas as categorias (Figura 20).

Figura 20 - Impactos ambientais na categoria *midpoint* medidos em *species.yr* na geração de 1 MJ de energia térmica para três cenários energéticos.

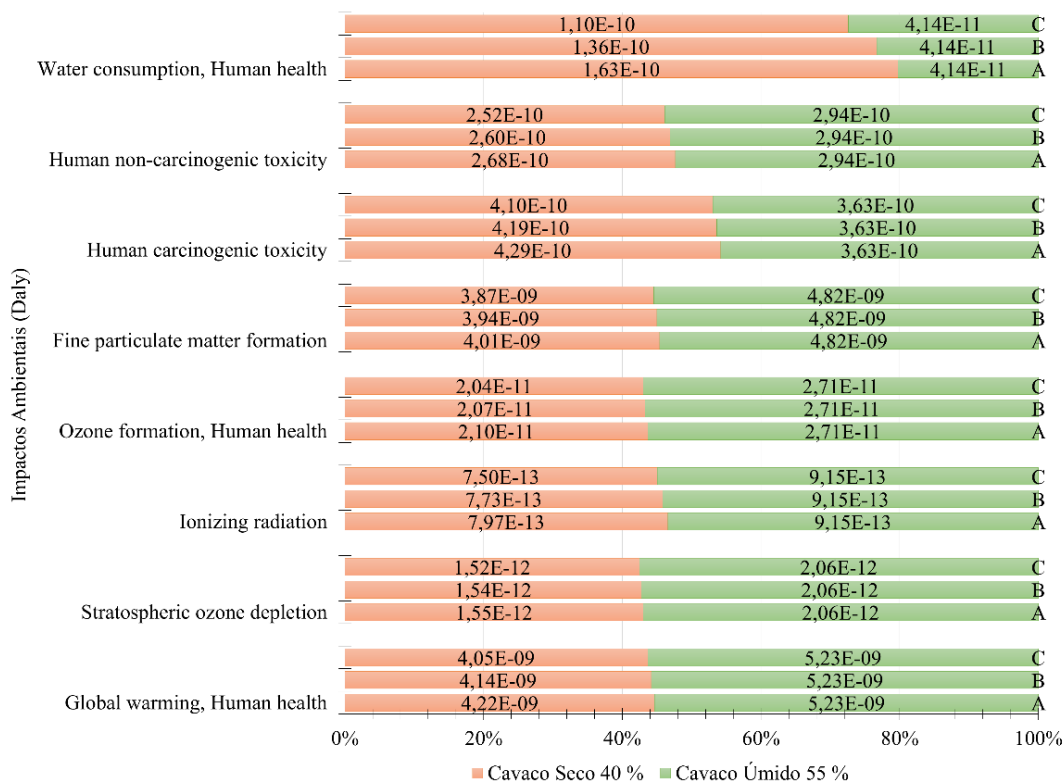


Fonte: Elaborada pela autora, 2020, de acordo com o *SimaPro*.

A Figura 20 mostra que o consumo de água, para ecossistemas aquáticos ou terrestres apresenta-se maior para o cavaco seco, bem como, observa-se a maior diferença de impacto entre os cenários CE-A, CE-B e CE-C. O menor impacto para as espécies está associado ao uso da terra, e corresponde a utilização do cavaco seco, o que deve-se ao fato do cavaco com menor TU ter um PCL maior, o que reduz a quantidade de cavaco necessária para 1 MJ de energia térmica. Conforme os dados utilizados pelo *SimaPro*, o uso da terra impacta devido ao cultivo da silvicultura e manuseio de máquinas na atividade florestal. Os demais impactos gerados, apresentados na Figura 4 tiveram baixa diferença entre os cenários, porém, percebe-se que em todos os casos, quanto maior o consumo energético para a secagem, maior é o impacto causado pelo cavaco seco.

As categorias de impacto medidas em *Daly*, que impactam na saúde humana, simuladas para os três cenários energéticos e considerando o cavaco com TU natural de 55% e com TU de 40% após a secagem, estão expressas na Figura 21. No geral, o cavaco úmido também se mostrou mais impactante do que o cavaco seco, em 54,7% de todos os impactos na saúde humana. Visualiza-se que o cavaco seco representa maior impacto no consumo de água, em comparação ao cavaco úmido, devido a atividade da silvicultura e utilização de máquinas, conforme as informações do *SimaPro*. A formação de partículas finas foi a categoria que apresentou o segundo maior valor, dentre os demais expressos na figura, configurando aproximadamente 44% dos impactos em na saúde humana. De acordo com o *SimaPro*, este impacto deve-se principalmente ao consumo de combustíveis fósseis.

Figura 21 - Impactos ambientais na categoria *midpoint* medidos em *Daly* para a geração de 1 MJ de energia térmica para três cenários energéticos.

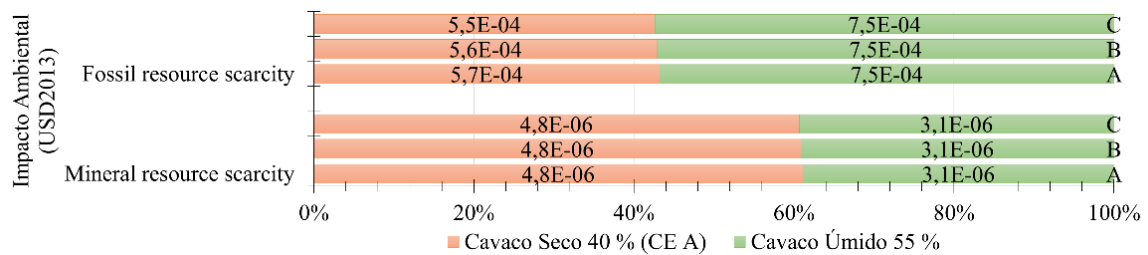


Fonte: Elaborada pela autora, 2020, de acordo com o *SimaPro*.

Na Figura 22 estão expressos os impactos ambientais medidos em *USD2013*, que representam os impactos em recursos naturais medidos em dólar. Esta classificação feita pelo *SimaPro* condiciona os impactos em apenas dois itens, escassez de recursos fósseis e escassez de recursos minerais. Denota-se, pela Figura 6, que o cavaco seco apresenta maior impacto na escassez de recursos minerais, o que está relacionado a extração de ferro e outros recursos minerais. Conquanto, na escassez de recursos fósseis é o cavaco úmido que apresentou maior impacto, o que se deve a utilização e extração de petróleo e seus derivados, conforme dados apresentados pelo *SimaPro*. Comparando as duas categorias, a maior expressividade de impacto está na utilização de recursos fósseis, com aproximadamente 99% dos impactos medidos em *USD2013*.

Figura 22 - Impactos ambientais na categoria *midpoint* medidos em *USD2013* na geração de 1 MJ de energia térmica para três cenários energéticos.





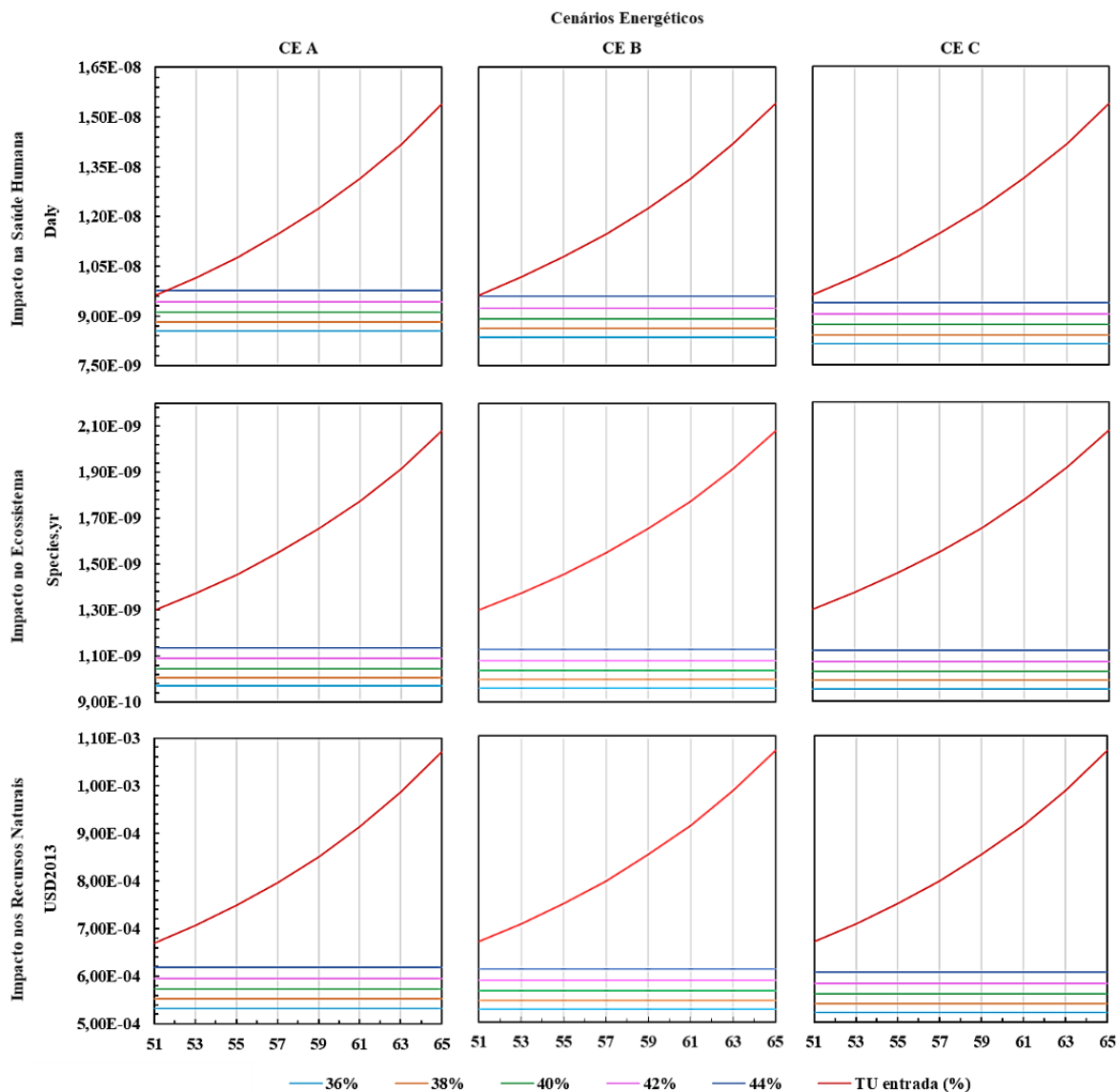
Fonte: Elaborada pela autora, 2020., de acordo com o *SimaPro*.

Para os resultados obtidos para o ponto médio considerando os três cenários energéticos, o *SimaPro* também possibilitou a interpretação dos resultados que foram menos expressivos entre o cavaco seco e o cavaco úmido. A formação de ozônio, emissão de partículas finas e acidificação terrestre têm relação com o diesel que é consumido pelas máquinas durante o processo de colheita e transporte da madeira. A eutrofização de água e a carcinogênese humana estão relacionados principalmente com a disposição final de resíduos de mineração. A ecotoxicidade terrestre, aquática e marinha relaciona-se com a utilização de caminhões durante o transporte. A produção de eletricidade via hidrelétricas impacta no consumo de água para a saúde humana e no consumo de água dos ecossistemas terrestres e aquáticos.

#### 4.3.2 Impacto ambiental em ponto final para os três cenários energéticos de secagem

Os impactos ambientais em categoria de ponto final (*endpoint*) foram expressos apenas para as simulações realizadas para os três cenários energéticos e os diferentes níveis de TU (Figura 23). Visualiza-se que o cavaco úmido, caracterizado na imagem pelos TU de entrada, tem impacto superior ao cavaco seco em praticamente todas as simulações.

Figura 23 - Impacto ambiental em ponto final para a geração de 1 MJ de energia térmica considerando os três cenários energéticos.



Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Dentre os três cenários energéticos, o impacto na saúde humana é o único que apresenta uma situação em que o cavaco seco é mais impactante do que o cavaco úmido. Quando, para o CE-A, o TU de entrada foi de 51% e o TU de saída foi de 44%, o cavaco seco apresenta um impacto de 0,4% maior do que o cavaco úmido, caracterizando que nesta condição o cavaco seco é ambientalmente mais impactante. Com relação aos cenários, percebe-se que a maior diferença visual de impacto entre o cavaco úmido e o cavaco seco é perceptível em ecossistemas. Contudo, em termos quantitativos, a maior diferença de impacto entre o cavaco úmido e o cavaco seco foi em recursos naturais.

Observa-se, que quanto maior o consumo energético para a secagem do cavaco, maior também é o impacto ambiental causado, para todas as categorias de ponto final e, conseqüentemente, menores são as diferenças de impacto em relação ao cavaco úmido. Conforme aumenta o consumo energético para a secagem do cavaco, diminui a diferença entre o impacto gerado pelo cavaco úmido e pelo cavaco seco. À medida que aumenta o TU de saída do cavaco do secador, percebe-se que diminui a diferença de impacto causado entre cavaco úmido e seco. O cavaco úmido apresenta um crescimento exponencial similar para as três categorias de impacto, pois, está intrinsicamente relacionado apenas a quantidade de cavaco utilizada para a geração de 1 MJ de energia.

#### 4.4 DISCUSSÃO

Este trabalho buscou apresentar os impactos ambientais relacionados ao processo de secagem do cavaco de madeira para fins de geração de energia térmica. Para isso, adotou-se a ACV como ferramenta de avaliação, apresentando os impactos nas categorias *midpoint* e *endpoint*, considerando três cenários energéticos para a secagem e diferentes TU de entrada e de saída do cavaco no secador rotativo.

O impacto do cavaco de madeira no ecossistema, para este trabalho, está relacionado ao cultivo da silvicultura e manuseio de máquinas na atividade. De acordo com Zelm et al. (2015), a unidade medida em espécies representa a qualidade do ecossistema terrestre, em quantias desaparecidas de espécies. Tal constatação pode ser comprovada e relacionada a este estudo, tendo em vista que o TU e o PCL são inversamente proporcionais, pois, quanto maior o TU do cavaco, menor será o seu PCL (BRAND et al., 2014), e conseqüentemente, maior é quantidade de madeira consumida para a geração de 1 MJ de energia térmica. O manejo florestal foi o estágio de maior contribuição para os impactos ambientais, independente da categoria avaliada, o que se deve à combustão de combustíveis fósseis nas operações com máquinas que envolvem o manejo da floresta (DIAS, 2014). Para San Miguel et al. (2015) a colheita foi a etapa mais significativa em termos ambientais e econômicos, devido ao alto consumo de energia pelas máquinas.

Zelm et al. (2015), também elaboraram seus resultados para que os impactos fossem medidos para 1 MJ de calor, assim, perceberam que a combustão da biomassa apresenta impactos menores na saúde humana, se forem desconsideradas as mudanças do carbono biogênico acima do solo, que resulta da extração de madeira da floresta para produção de biocombustível. Porém, se consideradas as mudanças biogênicas do carbono o impacto é maior

para a madeira do Brasil e da Alemanha. Ferro et al. (2018) também perceberam que a colheita da madeira de *pinus* é o estágio de maior impacto ambiental para nove categorias de impacto, e, assim como verificado neste trabalho, está relacionada com o uso do diesel pelas máquinas florestais. O transporte da madeira também foi apontado por Esteban et al. (2014) como um grande agente causador de impacto ambiental. De maneira análoga, Dias e Arroja (2012) também verificaram que a exploração madeireira é o estágio com maior impacto ambiental, tanto pelo consumo de combustíveis fósseis, como pela utilização de fertilizantes químicos.

Neste estudo, o impacto sobre a escassez de recursos fósseis foi maior para o cavaco úmido, o que se deve a extração de petróleo e gás natural que estão indiretamente relacionados ao processo de manejo da silvicultura e transporte, os quais pertencem ao ciclo de vida do cavaco. González-García et al. (2014) identificaram que a necessidade de combustível fóssil, consumido pelas máquinas utilizadas na extração do *pinus*, foi um dos principais agentes causadores de impactos ambientais. Proto et al. (2017) realizaram uma comparação entre diferentes cenários de exploração da biomassa residual sob a forma de cavaco. O estudo revelou que os benefícios ambientais não são garantidos, apesar do uso da madeira possibilitar a substituição dos combustíveis fósseis, visto que, para a geração de calor em caldeira de pequena escala, apresenta maiores impactos em oito das doze categorias avaliadas no estudo deles.

Quando comparada a utilização de óleo e cavaco para geração de energia térmica, percebe-se as únicas categorias de impacto que apresentaram maiores valores para o cavaco de madeira foram o potencial fotoquímico de formação de ozônio, em decorrência do uso das máquinas da colheita, e o potencial de eutrofização, decorrente da combustão da biomassa florestal primária (ESTEBAN, 2014). Dias (2013), constatou que o uso de equipamentos manuais, como a motosserra, gera impacto menor do que o uso de máquinas maiores para a colheita da madeira. Em consonância, Proto et al. (2017) também perceberam em seu estudo que o corte e processamento realizados por motosserra apresenta menor impacto ambiental. Bem como, verificaram que a extração é a operação responsável pela maior parte do impacto ambiental.

A quantificação dos impactos ambientais da geração de energia com biomassa florestal, incluindo como análises o potencial de aquecimento global, potencial de acidificação e o potencial de eutrofização foram realizados por Havukainen et al. (2018). Constata-se, pelo estudo dos mesmos, que a maior parte do potencial de aquecimento global, entre 82 a 92%, deu-se através da obtenção dos biocombustíveis usados pela usina de cogeração. Similarmente, Zelm et al. (2015) utilizaram a ACV para quantificar os impactos na saúde humana e nos ecossistemas terrestres causados pela extração de madeira utilizada como biocombustível.

Perceberam que podem existir benefícios ou impactos ambientais, variando conforme o país de origem da madeira. Ainda, segundo eles, as especificidades do local interferem nos impactos causados pela extração biomassa florestal, como, condições climáticas, tempo de rotação e estoque de biomassa.

#### 4.5 CONCLUSÃO

O objetivo inicial do presente trabalho foi apresentar o impacto ambiental causado pela utilização do cavaco de madeira com TU natural ou após processo de secagem em secador rotativo, utilizando a metodologia de ACV. Considerando o escopo proposto, a produção do conteúdo energético de 1 MJ via cavaco úmido apresenta maior impacto ambiental quando comparado com o cavaco seco, fundamentalmente devido a relação inversamente proporcional entre PCL e TU. Verificou-se que a principal causa de impacto ambiental no ciclo de vida do uso do cavaco de madeira é o uso de máquinas na silvicultura, devido, principalmente, à utilização de combustíveis fósseis, o que acontece antes da secagem do cavaco de madeira.

A secagem do cavaco apresentou maior expressividade de impacto no ecossistema, mais especificamente no consumo de água para as espécies, tanto aquáticas quanto terrestres, em comparação ao cavaco úmido. Do mesmo modo, o cavaco seco foi mais expressivo no impacto da saúde humana, medido em *Daly*, e na utilização de recursos minerais como impacto nos recursos naturais. Nas demais categorias de impacto apresentadas pelo programa *SimaPro*, foi o cavaco úmido que teve maior impacto ambiental.

Denotou-se por meio dos resultados apresentados, que o TU tem influência no impacto ambiental causado pela utilização de madeira para obtenção de energia térmica, visto que, quanto maior o TU do cavaco que sai do secador rotativo, maior também é o impacto causado por ele. A energia térmica a ser liberada pelo cavaco com baixo TU é maior, em comparação a um cavaco mais úmido, o que interfere na quantidade de cavaco que precisa ser consumida para a geração de 1 MJ de energia térmica. Deste modo, conforme o escopo proposto de comparação de impacto ambiental, afirma-se que a rota 2 apresenta menor impacto ambiental quando comparada a rota 1, de acordo com as premissas avaliadas neste estudo.

#### REFERÊNCIAS

ABNT. ISO 14040:2006 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. **ABNT**, p. 10, 2014.

- 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, abr. 2014. FapUNIFESP (SciELO). 2014.
- BRAND, M. A.; GIESEL, G. Influência da secagem da biomassa na eficiência de caldeira de cogeração energética. **Energia na Agricultura**, v. 32, p. 132–140, 2017.
- DEBONI, T. L. et al. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. **Renewable Energy**, v. 135, p.1291-1302, maio 2019. Elsevier BV. 2019.
- DIAS, Ana C. Life cycle assessment of fuel chip production from eucalypt forest residues. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 3, p.705-717, 22 nov. 2013. Springer Science and Business Media LLC. 2013.
- DIAS, A. C.; ARROJA, L. Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal. **Journal of Cleaner Production**, v. 37, p.368-376, dez. 2012.
- ESTEBAN, B. et al. Environmental assessment of small-scale production of wood chips as a fuel for residential heating boilers. **Renewable Energy**, v. 62, n. 2, p.106-115, fev. 2014.
- FERRO, F. S. et al. Environmental Life Cycle Assessment of industrial pine roundwood production in Brazilian forests. **Science Of The Total Environment**, v. 640-641, p.599-608, nov. 2018.
- GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of forest operations in Europe: Environmental and energy profiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 188–198, 2014.
- HAVUKAINEN, J. et al. Life cycle assessment of small-scale combined heat and power plant: Environmental impacts of different forest biofuels and replacing district heat produced from natural gas. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 837–846, 2018.
- IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Dados do Relatório Ibá 2018 – Ano-base 2017**. 2018. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/digital-sumarioexecutivo-2018.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2019.
- IEA. **International Energy Agency**. 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables/?country=WORLD&year=2017&energy=Renewables%20%26%20waste>>. Acesso em: 30 jan. 2019.
- PADILLA-RIVERA, A. et al. Environmental Performance of Eastern Canadian Wood Pellets as Measured Through Life Cycle Assessment. **Forests**, v. 8, n. 9, p. 18, 2017.
- PANG, S.; MUJUMDAR, A. S. Drying of woody biomass for bioenergy: Drying technologies and optimization for an integrated bioenergy plant. **Drying Technology**, v. 28, n. 5, p. 690–701, 2010.

PEREIRA, M. F.; NICOLAU, V. P.; BAZZO, E. Exergoenvironmental analysis concerning the wood chips and wood pellets production chains. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, n. October 2017, p. 253–262, 2018.

PROTO, A. R. et al. Roundwood and bioenergy production from forestry: Environmental impact assessment considering different logging systems. **Journal Of Cleaner Production**, v. 165, p.1485-1498, nov. 2017.

NISHIGUCHI, S.; TABATA, T. Assessment of social, economic, and environmental aspects of woody biomass energy utilization: Direct burning and wood pellets. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p.1279-1286, maio 2016.

MIGUEL, G. S. et al. Environmental, energy and economic analysis of a biomass supply chain based on a poplar short rotation coppice in Spain. **Journal Of Cleaner Production**, v. 94, p.93-101, maio 2015.

SILVA, F. A. da; SIMIONI, F. J.; HOFF, D. N. Diagnosis of circular economy in the forest sector in southern Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 706, p.1-10, mar. 2020.

SILVA, D. A. L. et al. Life cycle assessment of offset paper production in Brazil: Hotspots and cleaner production alternatives. **Journal of Cleaner Production**, v. 93, p. 222–233, 2015.

VAN ZELM, R. et al. Impacts of biogenic CO<sub>2</sub> emissions on human health and terrestrial ecosystems: The case of increased wood extraction for bioenergy production on a global scale. **Gcb Bioenergy**, v. 7, n. 4, p.608-617, 8 mar. 2014.

VERMA, M. et al. Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, n. December 2016, p. 732–741, 2017.

WAHRLICH, J.; SIMIONI, F. J. Industrial symbiosis in the forestry sector: A case study in southern Brazil. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 6, p.1470-1482, 25 Jul. 2019.

## 5 CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho teve por finalidade realizar uma avaliação energética, econômica e ambiental do uso de cavaco de madeira para a geração de energia térmica. Para tal, foram elaboradas duas ROTAS de utilização do cavaco de madeira industrial, estabelecidos cenários de consumo energético e simulados diferentes níveis de TU para o cavaco.

No Capítulo 2, apresentou-se a simulação do ganho e balanço energético do processo de secagem de cavaco de madeira com diferentes TU e TC. Verificou-se, pela execução do mesmo, que o TU possui maior influência sobre a capacidade energética do cavaco de madeira, quando comparado ao TC. Assim, quanto menor o TU, maior será o PCL, e, similarmente, quanto menor for o TC maior também será o PCL. Essas constatações estão estritamente relacionadas a quantidade de água retida na madeira que terá que evaporar para depois gerar calor, e pela quantidade de material que não queima, ou seja, que se transforma em cinza e não gera calor. O balanço energético do processo de secagem do cavaco de madeira mostrou-se como uma atividade energeticamente positiva em 70% das 120 simulações, ou seja, o saldo de energia gerada pelo cavaco seco é maior do que a energia gerada pelo cavaco úmido e os gastos energéticos de secagem.

No Capítulo 3 apresentou-se a avaliação econômica e de risco da secagem industrial de cavaco de madeira. Para isso, elaborou-se um fluxo de caixa do empreendimento de secagem industrial de cavaco de madeira. Por meio dos indicadores econômico financeiros denotou-se que o projeto é economicamente viável, com um *payback* de 1,63 anos, VPL de R\$ 5.726.223,68, TIR de 60,23% e relação Custo Benefício de 1,39. As análises de sensibilidade indicaram que o preço de venda do cavaco de madeira foi a variável que mais apresentou impacto econômico para o projeto. Somado a isto, as análises de risco demonstraram que mesmo com condições pessimistas de execução do projeto, ou seja, alto consumo energético para a secagem do cavaco, alto preço de compra e baixo preço de venda do cavaco, a TIR mínima foi de 23,91% e o VPL mínimo foi de R\$ 1.755.547,27, para as piores condições do projeto.

Por fim, no Capítulo 4 apresentou-se o impacto ambiental da diminuição do TU de cavaco de madeira em secador rotativo. Para a avaliação ambiental utilizou-se a metodologia de ACV, para a quantificação dos impactos ambientais na geração de 1 Mj de energia térmica, conforme o TU do cavaco de madeira. Percebeu-se que o cavaco úmido gera maior impacto ambiental em comparação ao cavaco seco, principalmente nos impactos em recursos naturais, o que está relacionado, principalmente, a sua massa. Quanto maior a massa do cavaco, ou seja,



quanto maior o seu TU, menor será o PCL e conseqüentemente, maior será a quantidade de cavaco a ser consumida para a geração de 1 Mj de energia térmica. Isso, também acaba por impactar nas áreas de plantio e no transporte do cavaco, gerando maiores impactos ambientais por meio deles.

Conclui-se, com base nos resultados apresentados nesse trabalho, que a rota 2, que é composta pelo processo de secagem do cavaco de madeira, é energeticamente positiva em seu balanço, economicamente viável e ambientalmente menos impactante, em relação a rota 1, conforme as definições e escopo de estudo aqui apresentados. Nota-se, que os resultados aqui apresentados corroboram com a literatura. Isto posto, torna-se muito importante a demonstração de tais resultados para os tomadores de decisão e todos aqueles envolvidos no mercado de comercialização e manufatura do cavaco, pois, contribuem para a clareza de uma melhor utilização do cavaco como fonte de energia térmica.

Deste modo, ocorre um maior aproveitamento energético do cavaco de madeira, como recurso natural e renovável de obtenção de energia térmica. Bem como, possibilita-se o desenvolvimento de empreendimentos com a finalidade de melhoria da qualidade do cavaco como combustível, contribuindo para o desenvolvimento econômico. Os impactos ambientais que podem ser reduzidos com a utilização de uma biomassa florestal de melhor qualidade energética devem ser considerados tanto quanto as questões econômicas e energéticas, visto a crescente discussão sobre a emissão de poluentes e aquecimento global, estritamente relacionados a atividade industrial do cavaco de madeira.

Contudo, cabe ressaltar que, para a implantação de um projeto desta natureza, faz-se necessária a realização de estudos complementares que envolvem as condições e estrutura de mercado locais, tais como os fornecedores, compradores e formas de competição. Adicionalmente, estudos futuros também podem ser realizados visando elucidar os impactos ambientais causados durante a queima da biomassa florestal nas caldeiras, com diferentes TU de umidade. Deste modo, também seria possível contribuir para a elaboração de novos *datasets*, específicos para o processo de queima do cavaco de *pinus* no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, V. A.; MALINOVSKI, R. A.; VASCONCELOS, J. S. Análise de viabilidade econômica de um processo de secagem de madeira para empresas madeireiras do sudoeste paulista. **Rev. Ciênc. Ext.** v.7, n.1, p.51, 2011.
- BRAND, M. A. et al. Influência das dimensões da biomassa estocada de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden na qualidade do combustível para geração de energia. **Revista Árvore**, v. 38, p. 175–183, 2014.
- DEBONI, T. L. et al. Models for estimating the price of forest biomass used as an energy source: A Brazilian case. **Energy Policy**, v. 127, p.382-391, abr. 2019.
- ELKINGTON, J. **Canibais com garfo e faca**. São Paulo: Makron Books, 2012.
- IEA, International Energy Agency. **Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy**. International Energy Agency (IEA), 2017.
- IEA, International Energy Agency. **Market Report Series Renewables 2018**. International Energy Agency, 2018.
- LAURILA, J.; HAVIMO, M.; LAUHANEN, R. Compression drying of energy wood. **Fuel Processing Technology**, v. 124, p.286-289, ago. 2014.
- MIGUEL, G. S. et al. Environmental, energy and economic analysis of a biomass supply chain based on a poplar short rotation coppice in Spain. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p.93-101, mai. 2015.
- MIRANDA, M. A. da S. **Potencial da biomassa florestal para produção de energia térmica industrial**. 2015. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós- Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6668>>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- NISHIGUCHI, S.; TABATA, T. Assessment of social, economic, and environmental aspects of woody biomass energy utilization: Direct burning and wood pellets. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p.1279-1286, maio 2016.
- PEREIRA, R. S. et al. Cost of forest insurance in the economic viability of eucalyptus plants. **Revista Árvore**, v. 42, n. 3, p.1-9, 13 set. 2018.
- PYÖRÄLÄ, P. et al. Effects of Management on Economic Profitability of Forest Biomass Production and Carbon Neutrality of Bioenergy Use in Norway Spruce Stands Under the Changing Climate. **Bioenergy Research**, v. 7, n. 1, p.279-294, 3 set. 2013.
- ROUTA, J. et al. Validation of prediction models for estimating the moisture content of logging residues during storage. **Biomass and Bioenergy**, v. 94, p.85-93, nov. 2016.

SEHNEM, S.; PEREIRA, S. C. F. Rumo à Economia Circular: Sinergia Existente entre as Definições Conceituais Correlatas e Apropriação para a Literatura Brasileira. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa**, v. 18, n. 1, p.35-62, jan. 2019.

SHABANI, N.; AKHTARI, S.; SOWLATI, T. Value chain optimization of forest biomass for bioenergy production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p.299-311, Jul. 2013.

SILVA, F. A. da; SIMIONI, F. J.; HOFF, D. N. Diagnosis of circular economy in the forest sector in southern Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 706, p.1-10, mar. 2020.

SIMIONI, F. J. et al. Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil. *Ciência Florestal*, v. 27, n. 2, p.731-742, 29 jun. 2017.

SIMIONI, F. J.; BINOTTO, E.; HOFF, D. N. A inovação tecnológica na perspectiva dos gestores da indústria madeireira da região de Lages, SC. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p.981-987, out. 2012.

VALENTE, C.; SPINELLI, R.; HILLRING, B. G. LCA of environmental and socio-economic impacts related to wood energy production in alpine conditions: Valle di Fiemme (Italy). **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 17-18, p.1931-1938, Nov. 2011.

WANG, C. et al. A life-cycle comparison of the energy, environmental and economic impacts of coal versus wood pellets for generating heat in China. **Energy**, v. 120, p.374-384, Fev. 2017.

ZHANG, F.; JOHNSON, D. M.; WANG, J. Integrating multimodal transport into forest delivered biofuel supply chain design. **Renewable Energy**, v. 93, p.58-67, ago. 2016.