

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS – PPGCAMB**

**LUCAS DE BONA SARTOR**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO PROCESSAMENTO DE MADEIRA**  
**SERRADA NO SUL DO BRASIL**

**LAGES**

**2022**

**LUCAS DE BONA SARTOR**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO PROCESSAMENTO DE MADEIRA  
SERRADA NO SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.  
Orientador: Prof. Dr. Flávio José Simioni  
Coorientador: Dr. Rodrigo A. F. Alvarenga

**LAGES**

**2022**

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

Sartor, Lucas de Bona

Avaliação do ciclo de vida do processamento de madeira serrada no Sul do Brasil / Lucas de Bona Sartor. -- 2022.

62 p.

Orientador: Flávio José Simioni

Coorientador: Rodrigo Augusto Freitas de Alvarenga

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, 2022.

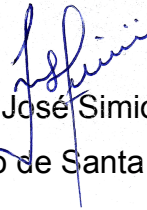
1. Indústria madeireira. 2. Serraria. 3. Biomassa florestal. 4. Hotspots ambientais. 5. Impacto ambiental. I. Simioni, Flávio José. II. Alvarenga, Rodrigo Augusto Freitas de. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. IV. Título.

**LUCAS DE BONA SARTOR**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO PROCESSAMENTO DE MADEIRA  
SERRADA NO SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.  
Orientador: Prof. Dr. Flávio José Simioni  
Coorientador: Dr. Rodrigo A. F. Alvarenga

**BANCA EXAMINADORA**



Flávio José Simioni

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membros:



Dra. Luana Dessbesell

École Polytechnique de Montréal, Montreal, Canadá



Dra. Juliana Ferreira Soares

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Lages, 22 de fevereiro de 2022.

Dedico este trabalho aos meus pais  
Zulmira Sartor e Clóvis de Bona Sartor,  
por sempre apoiarem e incentivarem  
meus estudos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por sempre estar abençoando meu caminho, me fortalecendo para enfrentar os desafios que surgem em minha vida! Ele desperta o melhor de mim, por meio da fé, persistência e coragem.

A proteção e amparo do meu anjo da guarda foi essencial para a realização deste trabalho, ele sempre está ao meu lado para me motivar e mostrar que tudo é possível basta acreditarmos.

Minha família sempre esteve ao meu lado nessa caminhada, a gratidão que tenho por eles é imensa. Meus pais sempre me motivam a seguir estudando e nunca desistir dos meus objetivos, bem como, meus irmãos, ao meu lado em cada dificuldade e vitória alcançada. É querer sempre o melhor para eles o meu propósito de estar aqui neste momento. Obrigado família!

Agradeço do fundo do coração aos meus amigos que estiveram ao meu lado neste tempo, ouviram meus desabafos e angústias, me motivaram a continuar e crescer cada dia mais. O convívio com eles com certeza foi a dose essencial que fortaleceu minha chegada até aqui. Obrigado amigos!

Quero deixar meu agradecimento ao CAV/UDESC, pelo apoio e oportunidade fornecidos, assim como, a CAPES pelo financiamento da bolsa de mestrado ao longo de todo meu período como pesquisador.

Ao corpo docente, pelos conhecimentos repassados e a troca constante de experiências. Em especial aos meus orientadores Flávio e Rodrigo, pelo incentivo e dedicação para com esta pesquisa, vocês foram meu alicerce até aqui.

Gratidão pelas pessoas que conheci e lugares que pude fazer parte neste tempo. De maneira geral, quero agradecer a tudo e a todos, meu coração fica apertado nessa reta final, mas a sensação de alívio paira junto.

A vida é feita de ciclos e renovações, precisamos gastar toda energia e apreciar ao máximo o ciclo em que estamos, para quando passarmos para o seguinte renovarmos nossa energia com os aprendizados e lembranças inesquecíveis.

“A persistência é o caminho do êxito.”  
Charles Chaplin

## RESUMO

O objetivo deste estudo foi quantificar e analisar os aspectos e impactos ambientais do processamento de madeira serrada no sul do Brasil pela Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O cenário de estudo foi obtido com base em uma serraria de médio porte, destinada à produção de madeira serrada e uma indústria de equipamentos e serras para o setor madeireiro, ambas localizadas no município de Lages/SC. A unidade funcional do sistema foi baseada na produção de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada ao mercado consumidor. Os dados foram coletados a partir de visitas e contato com especialistas das empresas. A modelagem foi realizada por meio do *software* SimaPro com a base de dados ecoinvent, sendo o ReCiPe 2016 o método de impacto ambiental escolhido nas categorias *midpoint* e *endpoint*. Os resultados indicam que o pátio de toras apresentou a maior contribuição de uso do aço e o menor insumo de diesel no sistema. A geração de energia térmica, especificamente a operação da caldeira de biomassa, apresentou as maiores concentrações de poluentes emitidas no ar atmosférico. As categorias com maior impacto ambiental ao longo do processo produtivo foram toxicidade humana, ecotoxicidade, aquecimento global, escassez de recursos fósseis e consumo de água. Os *hotspots* ambientais do sistema foram o pátio de toras, geração de energia térmica e secagem. O uso de energia elétrica como fonte de alimentação de carregadeiras e/ou empilhadeiras é uma alternativa ambiental a ser avaliada para diminuir os impactos ambientais do processamento de madeira serrada.

**Palavras-chave:** indústria madeireira; serraria; biomassa florestal; *hotspots* ambientais; impacto ambiental.



## ABSTRACT

This study aimed to quantify and analyze the processing of sawn wood in southern Brazil by Life Cycle Assessment (LCA). The case study was based on a medium-sized sawmill producing sawn wood and an equipment provider for the lumber sector, located in Lages/SC. The system functional unit was based on 1 m<sup>3</sup> of sawn wood products for the consumer market. The data were collected by visits and contact with specialists in the companies. SimaPro was the simulation tool used considering the Ecoinvent database, with ReCiPe 2016 being the environmental impact method chosen in the midpoint and endpoint categories. The log yard presented the highest contribution of steel use and the lowest diesel input in the system. The thermal energy generation, specifically the biomass boiler's operation had the most elevated pollutants emitted to the atmosphere. The categories with most significant environmental impact throughout the production process were human toxicity, ecotoxicity, global warming, scarcity of fossil resources, and water consumption. The system's environmental hotspots were the log yard, thermal energy generation and drying. Using electrical energy as a power source for loaders and/or forklifts is an environmental alternative to be considered to reduce the environmental impacts of sawn wood processing.

**Keywords:** lumber industry; sawmill; forest biomass; environmental hotspots; environmental impact.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	28
Figura 2 - Diagrama de corte da serraria objeto de estudo. ....	29
Figura 3 - Limite do sistema do processo de madeira serrada.....	31

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Potencial de impacto do processamento de 1 m <sup>3</sup> de madeira serrada por categoria.....	44
Gráfico 2 - <i>Hotspots</i> ambientais do processamento de 1 m <sup>3</sup> de madeira serrada.....	46
Gráfico 3 - Impacto do pátio de toras no processamento de 1 m <sup>3</sup> de madeira serrada. ....	47
Gráfico 4 - Impacto do corte no processamento de 1 m <sup>3</sup> de madeira serrada.....	48
Gráfico 5 - Impacto da geração de energia térmica no processamento de 1 m <sup>3</sup> de madeira serrada.....	49
Gráfico 6 - Impacto da secagem no processamento de 1 m <sup>3</sup> de madeira serrada. ....	50
Gráfico 7 - Impacto da expedição no processamento de 1 m <sup>3</sup> de madeira serrada. ....	50
Gráfico 8 - Impacto da substituição do diesel e GLP por energia elétrica no processamento de 1 m <sup>3</sup> de madeira serrada. ....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do processamento de 1 m <sup>3</sup> de madeira serrada.....	37
Tabela 2 - Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) do processamento de 1 m <sup>3</sup> de madeira serrada.....	42

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
3.1	MADEIRA SERRADA TRATADA .....	17
3.2	<i>CROSS LAMINATED TIMBER (CLT)</i> .....	17
3.3	<i>LAMINATED VENEER LUMBER (LVL)</i> .....	20
3.4	<i>MEDIUM DENSITY PARTICLEBOARD (MDP)</i> .....	21
3.5	<i>MEDIUM DENSITY FIBERBOARD (MDF)</i> .....	21
3.6	PRODUTOS DERIVADOS DA MADEIRA SERRADA.....	22
3.7	MADEIRA SERRADA.....	23
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	28
4.2	OBJETO DE ESTUDO .....	29
4.3	DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO.....	31
<b>4.3.1</b>	<b>Unidade funcional e fluxo de referência.....</b>	<b>31</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Limites do sistema .....</b>	<b>31</b>
4.3.2.1	<i>Pátio de toras .....</i>	<i>32</i>
4.3.2.2	<i>Corte.....</i>	<i>32</i>
4.3.2.3	<i>Geração de energia térmica .....</i>	<i>33</i>
4.3.2.4	<i>Secagem .....</i>	<i>33</i>
4.3.2.5	<i>Expedição.....</i>	<i>34</i>
4.4	MULTIFUNCIONALIDADE DO SISTEMA (ALOCAÇÃO).....	34
4.5	ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV).....	35
4.6	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV).....	35
4.7	CENÁRIO ALTERNATIVO DE SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL E GLP POR ENERGIA ELÉTRICA.....	36
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
5.1	ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV).....	37
5.2	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV).....	42
<b>5.2.1</b>	<b>Impactos nas categorias <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i>.....</b>	<b>42</b>

5.2.2	<i>Hotspots</i> ambientais .....	46
5.2.3	Cenário alternativo de substituição do diesel e GLP por energia elétrica.....	52
6	CONCLUSÃO .....	55
	REFERÊNCIAS.....	56
	APÊNDICE A - LIMITE DO SISTEMA DETALHADO.....	52

## 1 INTRODUÇÃO

O manejo sustentável e o processo fabril são responsáveis pela produção de bioprodutos madeireiros essenciais para rotina populacional. A indústria de base florestal brasileira planta diariamente 1 milhão de árvores produtivas, destinando 9,5 milhões de hectares para cultivos industriais e outros 6 milhões para conservação. A soma dessas áreas têm potencial de estoque de 4,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. As árvores plantadas, em geral eucalipto (78%), pinus (18%) e teca (4%), são colhidas e beneficiadas para que a madeira se adeque ao produto final desejado (IBÁ, 2021).

A demanda global por madeira serrada é constante devido a facilidade de obtenção desta matéria-prima e sua aplicação em diversos setores da economia. A madeira é um recurso renovável multifuncional adequado para vários materiais e fins energéticos, além de ser um grande sumidouro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Embora as emissões do processamento de fabricação da madeira serrada contribuam para o aquecimento global, ao mesmo tempo, quando praticado de maneira sustentável, esse processo pode diminuir a demanda por recursos não renováveis (RATNASINGAM et al., 2015; SUTER; STEUBING; HELLWEG, 2017).

Os produtos do setor madeireiro são produzidos a partir de toras de madeira de florestas plantadas, sobretudo das espécies de *Pinus* e *Eucalyptus*, sendo que a qualidade e as dimensões determinam o tipo do produto final. A madeira em tora é processada industrialmente para formar madeira serrada, laminada e polida, por exemplo. Este processamento produz resíduos madeireiros, como cascas, serragem e cavacos, os quais são fonte de matéria-prima para fabricação de produtos de valor agregado, como moldagem, marcenaria, móveis, painéis compensados, aglomerados, entre outros. Além disso, esses resíduos podem ser utilizados em indústrias como combustíveis para a geração de energia térmica em fornos e caldeiras de biomassa (RAMASAMY et al., 2015; SAHOO et al., 2019). No Sul do Brasil, o setor madeireiro é destaque na Serra Catarinense, a qual apresenta o maior desenvolvimento econômico nesse segmento (43%) comparado as demais mesorregiões do estado de Santa Catarina (SDS; SEBRAE, 2014).

O processo de fabricação da madeira serrada é realizado em serrarias, e geralmente envolve os estágios de estocagem no pátio de toras, descascamento, corte em seções horizontais e verticais, serragem em tábuas, geração de energia térmica, secagem em estufa e expedição para o mercado consumidor. O resíduo madeireiro é gerado pelo descascamento e corte da madeira, sendo utilizado na caldeira para geração de energia térmica para a secagem do produto serrado. O processamento envolve diferentes maquinários, combustíveis, insumos e energia, caracterizados como aspectos ambientais que podem levar a impactos sobre o solo, à água e à qualidade do ar (ADHIKARI; OZARSKA, 2018).

Deste modo, conhecer de maneira holística o desempenho ambiental dos produtos madeireiros permite que *stakeholders* entendam os impactos de suas escolhas nas tomadas de decisão empresarial. Por isso, as organizações estão adotando programas de gestão ambiental com abordagens mais proativas e estratégicas, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) que avalia aspectos e impactos ambientais associados ao ciclo de vida de produtos e/ou serviços, desde a extração da matéria-prima até a destinação final dos resíduos gerados (MURALIKRISHNA; MANICKAM, 2017). Além disso, a ACV auxilia na melhoria contínua do processo produtivo e contribui para o ecodesign de produtos e serviços (HEIDARI et al., 2019). A metodologia de ACV é instruída pelas normas ISO 14040 e 14044, que dispõe sobre os princípios e estrutura, requisitos e orientações, respectivamente. O estudo inclui as fases de definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação (ABNT, 2009).

Com isso, a eficiência de produção das serrarias tem impacto significativo nos resultados de ACV de produtos madeireiros. Os valores de entrada e saída dessa cadeia produtiva frequentemente dependem de conjuntos de dados sobre os tipos de produtos de madeira, desempenho fabril para uma determinada região, vida útil e destinação final (BUCHHOLZ et al., 2021). Além disso, em estudos de ACV, os limites do sistema são fundamentais para identificar processos relevantes ao longo de todo ciclo de vida de um produto, quantificar os recursos de entrada e as emissões de saída (SAHOO et al., 2019).



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar e avaliar os aspectos e impactos ambientais do processamento de madeira serrada no sul do Brasil.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar e descrever as etapas e sistemas do fluxo de produção do processamento de madeira serrada;

Quantificar e qualificar os aspectos ambientais provenientes do processamento de madeira serrada;

Determinar e analisar os impactos ambientais resultantes do processamento de madeira serrada;

Apresentar as potenciais etapas do processamento de madeira serrada que contribuem para intensificação dos impactos ambientais;

Propor cenário alternativo para atenuação dos impactos ambientais gerados no processamento de madeira serrada.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira em tora, uma vez serrada, é normalmente beneficiada por secagem e aplainamento para lisura e dimensionamento adequado. A madeira serrada pode ser usada no estado em que se encontra para a construção ou processada em outros produtos, como mobílias, pisos, rodapés e produtos madeireiros para edifícios e residenciais, entre outros fins (BERGMAN, 2010). Pesquisas recentes estudaram os aspectos e impactos ambientais desses subprodutos derivados da madeira serrada por meio da ACV, conforme apresentado a seguir.

#### 3.1 MADEIRA SERRADA TRATADA

Os estudos de Bolin; Smith (2011a) e Tsang et al. (2014) investigaram os impactos ambientais do ciclo de vida do berço ao túmulo relacionados ao tratamento da madeira serrada com cobre alcalino quaternário (CAQ), um conservante de base aquosa que utiliza cobre e composto de amônio quaternário. O uso de madeira tratada com CAQ para decks apontou menor uso de combustível fóssil e impactos ambientais comparado ao decks de madeira e plástico. Os maiores impactos do tratamento com CAQ são consequência do uso de etanolamina como solvente, tanto na etapa de produção quanto no transporte. A madeira serrada tratada com borato para uso estrutural em construções ofereceu menores impactos ambientais quando comparada a estrutura de aço galvanizado, segundo estudo de ACV realizado por Bolin; Smith (2011b). O uso de químicos no tratamento da madeira serrada é um motivador para realização de ACVs comparativas entre os métodos menos poluentes de tratamento da madeira serrada.

#### 3.2 *CROSS LAMINATED TIMBER* (CLT)

Chen; Pierobon; Ganguly (2019) e Lan et al. (2019) avaliaram pela ACV os impactos ambientais da produção de painéis de *Cross Laminated Timber* (CLT) no oeste e sudeste dos Estados Unidos. A CLT consiste em várias camadas de tábuas de madeira serrada que são empilhadas e pressionadas em direções alternadas para formar um painel sólido de tamanho e formato uniformes. O uso desse material gerou interesse significativo entre as

indústrias de produtos madeireiros, para fabricação de edifícios médios e altos, sendo uma alternativa adequada de substituição do concreto ou aço em muitos projetos de construção. A maior fonte de emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) neste processo, foi a produção de madeira serrada e a transformação em CLT. Porém, as instalações de fabricação de CLT podem atingir uma redução de até 14% no potencial de aquecimento global dos painéis de CLT, por meio da aquisição de madeira local e com o uso de espécies de madeira mais leves.

Em Oregon nos Estados Unidos, Puettmann; Sinha; Ganguly (2019) estudaram o ciclo de vida do berço ao portão da CLT. O estágio de fabricação conduziu a maioria dos impactos ambientais devido à produção de resina e o consumo de energia local, principalmente gás natural. A produção de madeira serrada (do portão ao portão) usou quase 100% da energia térmica proveniente de combustível lenhoso residual, enquanto os combustíveis fósseis permaneceram a principal fonte de energia durante a produção de CLT. O uso de gás natural foi o principal contribuinte para o valor do potencial de aquecimento global para CLT, enquanto a biomassa florestal representou 75% da energia para a produção de madeira serrada. A produção de CLT teve uma emissão negativa de carbono de 784 kgCO<sub>2eq.</sub>, pois armazena mais carbono no produto final do que é emitido durante o processo produtivo.

As atividades florestais e o transporte de madeira desempenharam um papel importante no impacto ambiental geral dos painéis de CLT (CHEN; PIEROBON; GANGULY, 2019). Segundo Lan et al. (2019) a maior fonte de emissão de GEE foi a fabricação de CLT, incluindo a produção de madeira serrada e a produção de CLT. A conversão de resíduos da serraria em produtos de madeiras duráveis reduziu as emissões gerais de 1 hectare de GEE em comparação com a queima dos resíduos para secar madeira, mas aumentou amplamente as emissões de GEE de base fóssil, pois utilizou gás natural como fonte de energia térmica para secagem de madeira. Em cenários de aplicação da CLT, Liang; Gu; Bergman (2021) compararam o ciclo de vida do berço ao túmulo de um edifício construído a base de CLT ou concreto na região noroeste do Pacífico dos Estados Unidos. Os resultados da ACV mostraram que a construção com CLT obteve melhor desempenho levando em

consideração o potencial de aquecimento global comparado à construção de concreto.

Robertson; Lam; Cole (2012) realizaram uma ACV comparativa entre um edifício de médio porte com estrutura tradicional de concreto armado moldado no local e um design híbrido com madeira laminada e CLT, localizados na costa oeste do Canadá. O projeto de construção híbrido exibiu desempenho ambiental superior em todas as categorias de impacto, com exceção do total de energia incorporado do berço ao portão, ou seja, do manejo florestal ao processo de fabricação. Ainda no Canadá, Padilla-Rivera; Amor; Blanchet (2018) aplicaram uma ACV do berço ao portão a fim de quantificar o potencial geral de redução de carbono em uma construção de linha de base com estrutura de madeira. Durante o ciclo de vida, a fase de fabricação dos materiais de construção foi a que mais contribuiu para as emissões de carbono (75%), enquanto o transporte (13%), a construção (1%) e a gestão de resíduos (11%) contribuíram com 25%. O estudo apontou uma redução geral de carbono de aproximadamente 104 kg CO<sub>2</sub>eq (38%) em comparação ao cenário de linha de base sem estrutura madeireira (PADILLA-RIVERA; AMOR; BLANCHET, 2018).

Com objetivos similares Guo et al. (2017a) e Guo et al. (2017b) investigaram, por meio da ACV, o desempenho de economia de energia e redução de carbono em edifícios residenciais de CLT em diferentes zonas climáticas e na região de frio severo da China, respectivamente. O consumo estimado de energia e as emissões de carbono em edifícios CLT foram, respectivamente, 29,4% e 24,6% (GUO et al., 2017a), e 9,9% e 13,2% (GUO et al., 2017b) menores do que em edifícios de concreto armado. Em Pequim, Gong et al. (2012) comprovaram utilizando ACV que a construção em madeira é mais eficiente em termos de consumo de energia e emissão líquida de CO<sub>2</sub> comparada as construções de concreto e aço.

Em termos de balanço de GEE do ciclo de vida da CLT, menos GEE derivados de fontes fósseis foram emitidos durante a produção de lajes a base de CLT em comparação as lajes de concreto armado para reforma de pontes no Japão (IWASE et al., 2020). Nakano; Karube; Hattori (2020) avaliaram os impactos ambientais da fase inicial à instalação de um edifício CLT no Japão,

os resultados apontaram que o carbono biogênico fixado na construção foi responsável por 32% do total de emissões de GEE da construção civil do edifício.

### 3.3 LAMINATED VENEER LUMBER (LVL)

Outras ACVs comparativas para construção de edifícios residenciais foram conduzidas por Lu et al. (2017) e Lu; El Hanandeh; Gilbert (2017) na Austrália, em relação ao desempenho ambiental da *Laminated Veneer Lumber* (LVL) com aço e concreto. A LVL obteve um desempenho melhor na categoria de potencial de aquecimento global, devido à baixa intensidade de energia e a utilização de material de baixo valor na fabricação das vigas LVL. A viga de aço teve um desempenho ligeiramente melhor do que a viga de concreto principalmente devido ao seu peso mais leve, o que levou à redução da energia e consumo de materiais, bem como transporte. A reciclagem do aço contribuiu para significativa compensação de emissão de GEE.

O processo de fabricação da LVL foi estudado pela ACV do berço ao túmulo no Sudeste e Noroeste Pacífico dos Estados Unidos. Esse processo incluiu os estágios de operações florestais, produção de folheado a seco e LVL. O consumo de eletricidade, seguido pelo uso de gás natural, apresentou contribuições de 45% e 42% para a categoria de potencial de aquecimento global no Sudeste e Noroeste Pacífico, respectivamente, devido a menor disponibilidade de biomassa lenhosa para energia térmica e produção de resina. A resina, embora seja uma pequena porção do produto final, teve maior influência na categoria de impacto de destruição da camada de ozônio comparada a madeira. A contribuição das operações florestais para o consumo de energia e o impacto ambiental resultante foram menores em relação às emissões no estágio de produção (BERGMAN; ALANYA-ROSENBAUM, 2017).

Neste contexto, Jia et al. (2019) avaliaram o ciclo de vida da produção de LVL sob uma perspectiva do berço ao túmulo. As categorias de impacto ambiental mais importantes foram o esgotamento abiótico e energia primária, potencial de acidificação, eutrofização de água doce, potencial de aquecimento global e material particulado. As principais fontes de emissões incluíram os

processos de colagem e envelhecimento, que liberam quantidades excessivas de formaldeído para o ar atmosférico.

### 3.4 *MEDIUM DENSITY PARTICLEBOARD* (MDP)

Em relação aos produtos madeireiros aglomerados e compensados, Silva et al. (2013) apresentaram uma ACV do *Medium Density Particleboard* (MDP) produzido no Brasil. A produção industrial foi responsável pela maior parte dos impactos em todas as categorias de impacto, exceto, ecotoxicidade. Os principais *hotspots* identificados foram o uso de óleo combustível pesado como fonte de energia térmica na fabricação de MDP e a produção de resina de ureia formaldeído usada como adesivo sintético. Na produção florestal, a aplicação de herbicida glifosato no solo em operações florestais foi o principal responsável pelos impactos na categoria de ecotoxicidade.

### 3.5 *MEDIUM DENSITY FIBERBOARD* (MDF)

Uma ACV conduzida por Kouchaki-Penchah et al. (2016) estudou a interface entre o consumo de energia e as emissões relacionadas ao processo de fabricação do *Medium Density Fiberboard* (MDF) no Irã. O sistema de preparação da fibra foi o maior contribuinte para os impactos ambientais. A produção de resina de ureia formaldeído foi identificada como o principal *hotspot*, exceto nos impactos depleção biótica, acidificação, depleção da camada ozônio e oxidação fotoquímica em que o gás natural, eletricidade, transporte e processo de produção foram os principais *hotspots*, respectivamente.

Segundo Inventário do Ciclo de Vida (ICV) da produção de MDF elaborado por Puettmann; Oneil; Wilson (2013), as emissões tiveram origem nas áreas da caldeira, secagem e prensagem, em função do combustível queimado e do uso de resina de ureia formaldeído. As emissões geradas nas etapas florestais foram menores em relação às emissões de fabricação de MDF. Em relação a energia total consumida no processo produtivo, 46% foram provenientes de fontes renováveis e 54% de fontes não renováveis.

Nesta linha, Wenker et al. (2016); Wenker; Richter; Rüter (2017); Wang; Wu; Chen (2021) implementaram a ACV para estruturas residenciais e

mobiliários a base de aglomerados e compensados. A ACV de portas interiores e móveis de madeira produzidos na Alemanha apresentaram que os maiores impactos ambientais foram causados pela fabricação de produtos e acessórios de madeira semiacabados, ou seja, a etapa de produção da madeira bruta para fabricação dos respectivos produtos madeireiros (WENKER ET AL. 2016; WENKER; RICHTER; RÜTER 2017). A produção de uma cama box a base de madeira na China foi analisada por meio da ACV, o estudo apontou o processamento da madeira serrada e laminada como o principal contribuinte para a pegada de carbono, respondendo por 74,6% a 80,7% da pegada de carbono total, seguido pelos processos de produção do mobiliário, distribuição e descarte (WANG; WU; CHEN 2021).

### 3.6 PRODUTOS DERIVADOS DA MADEIRA SERRADA

Por outro lado, no Canadá, Chen et al. (2018) avaliaram o ciclo de vida dos principais produtos madeireiros produzidos no país, entre eles, madeira serrada, painel estrutural e não estrutural e celulose e papel. Uma abordagem do berço ao túmulo, desde a madeira colhida até o descarte do produto obsoleto foi considerado no estudo. As principais emissões de carbono ocorreram nas etapas de colheita florestal, transporte de madeira e fabricação, enquanto as emissões de metano após descarte foram cumulativas e aumentaram conforme decomposição da madeira ao longo do tempo.

Outros subprodutos da madeira serrada foram analisadas por meio de ACV comparativa, entre um modelo de cadeira de eucalipto e um novo *design* desse modelo desenvolvido baseado no programa de produção mais limpa no Brasil. O ciclo de vida do berço ao túmulo desse produto revelou que a demanda de energia cumulativa foram significativamente maiores do que os resultados relatados no programa de produção mais limpa original. O valor final do novo *design* foi 5% superior ao valor do modelo básico, principalmente pela energia cumulativa contida no assento de compensado que substituiu o assento de eucalipto no modelo básico. Essa quantidade de energia não fazia parte do programa de produção mais limpa, portanto, não foi considerada quando as economias de energia foram estimadas. Esse resultado pode ser explicado considerando que a ACV considerou todas as contribuições incluídas

nos limites do sistema, não apenas a eletricidade direta utilizada na fabricação dos produtos, mas a energia total contida nos materiais, transportes e transformações até o destino final (PANAMEÑO et al., 2019).

A aplicação de produtos derivados da madeira serrada na construção civil, projetos arquitetônicos e mobiliários, apresenta uma variedade de estudos principalmente em ACVs comparativas com estruturas metálicas ou matérias-primas de fonte fóssil, de forma a comprovar o uso sustentável desses produtos, devido ao estoque de carbono que a madeira representa ao longo de seu ciclo de vida.

### 3.7 MADEIRA SERRADA

A partir daqui o enfoque dos estudos é voltado diretamente para a ACV do processamento de madeira serrada em serrarias. O estudo de Kawata et al. (2012) teve como objetivo analisar por meio da ACV o efeito da redução de CO<sub>2</sub> na etapa de secagem de madeira serrada pelo processo de secagem híbrido, o qual combina um processo de secagem a vapor com um processo dielétrico de micro-ondas em comparação ao processo convencional de secagem a vapor por caldeira a óleo. A partir da análise, conclui-se que as emissões de CO<sub>2</sub> reduziram em 0,215 milhões de toneladas por emissão do sistema de secagem híbrido. Além disso, o sistema híbrido leva a uma maior produtividade, pois poucas peças quebram ou reduzem as dimensões ao longo do processo de secagem.

Uma ACV do berço ao túmulo dos impactos e benefícios ambientais associados à cadeia de valor da madeira serrada na Suíça foi estudada por Suter; Steubing; Hellweg (2017). A produção florestal e o uso de madeira no fornecimento de energia térmica causaram impactos ambientais pequenos, em termos de emissões de GEE. O processo de combustão resultou em altas emissões atmosféricas de particulados. Além disso, a produção de placas à base de madeira causaram impactos ambientais relativamente altos, sendo os produtos químicos, resinas e a energia necessária no processo, os contribuintes mais significativos.

Buchholz et al. (2021) avaliaram o ciclo de vida do carbono do processamento de madeira serrada desde as operações florestais até a



fabricação para uso, de modo a representar o estado atual da indústria de processamento madeireiro na Califórnia. O uso de combustível fóssil variou de 3,9 a 6,8 L.m<sup>-3</sup> do volume de madeira colhida. O consumo de combustível do local de colheita para a serraria foi em média 2,1 km.L<sup>-1</sup>. A eficiência da serraria, medida na fração de madeira serrada e subprodutos duráveis dividida pelo volume processado, foi de 67,6%, sendo 71% a taxa de conversão total da madeira serrada, com outros 9% armazenados em subprodutos duráveis, incluindo matéria-prima para papel e celulose. Um total de 82,3% da demanda de energia térmica do processo, foi coberta pela biomassa residual fornecida internamente durante o processamento da madeira serrada, sendo, apenas 2,4% derivada de combustíveis fósseis (gás natural).

O estudo de Leino et al. (2016) enfocou a redução das emissões de GEE e a economia na produção de energia elétrica renovável em serrarias, a partir da geração de eletricidade por um turbogerador hermético (TGH). As principais vantagens da estrutura hermética é não possuir unidade de purificação de água adicional, pois não há perdas de água no sistema. O processo TGH requer vapor superaquecido e, portanto, é aplicável apenas em serrarias com caldeiras a vapor. Os resultados da ACV desse sistema alternativo apontaram emissões adicionais de GEE no processo, caso os resíduos madeireiros (serragem e casca) utilizados para a produção de energia térmica fossem substituídos por combustível fóssil. Deste modo, as reduções de emissão de GEE poderiam ser alcançadas a partir do excesso de resíduos madeireiros provenientes da serraria. Além disso, do ponto de vista tecnológico, esse sistema alternativo apresentou potencial de implementação em serrarias que utilizam caldeira a vapor e a secagem não requer altas temperaturas.

O desempenho ambiental do setor de serraria na Malásia foi avaliado usando a técnica de ACV. O limite do sistema do portão ao portão, inclui as etapas de processamento e transporte interno para fabricação de madeira serrada, excluindo os dados de maquinário e mão de obra. Em geral, a emissão de CO<sub>2</sub> foi a maior, seguida pelo SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e CO. A emissão de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O pela geração de energia elétrica e o consumo de combustível diesel foi insignificante. A avaliação dos potenciais impactos ambientais pelo processo

de fabricação da madeira serrada resultou no potencial de aquecimento global (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O), acidificação (SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>), toxicidade humana (NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>), eutrofização (NO e NO<sub>2</sub>) e formação de foto-oxidante (CO, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>) (RAMASAMY et al., 2015). Em estudo com objetivos similares na Malásia, Ratnasingam et al. (2015) apontaram que a produção de madeira serrada em regiões tropicais apresentaram uma pegada de carbono mais alta em comparação com as de espécies não tropicais. A diferença observada pôde ser atribuída ao menor rendimento da serraria e a maior proporção de resíduos produzidos pelo setor madeireiro na região tropical.

O processamento da madeira serrada foi estudado pela metodologia de ACV nos Estados Unidos. Puettmann; Wagner; Johnson (2010) e Milota; Puettmann (2017) elaboraram um ICV para a produção de madeira serrada nas regiões noroeste e sudeste. A abordagem do portão ao portão considerou as etapas de pátio de toras, serragem, secagem, aplainamento e geração de energia térmica, contemplando o uso de matéria-prima e combustível, consumo de eletricidade e emissões no local. Em cada região, mais de 70% da energia foi proveniente de fontes renováveis (biomassa florestal) e menos de 30% de fontes não renováveis (combustíveis fósseis). Os equipamentos utilizados no aplainamento (acabamentos e expedição) consumiram a maior quantidade de energia elétrica (45%) em comparação com os processos de pátio de toras, serraria e secagem. O CO<sub>2</sub> representou 98% em massa de todas as emissões atmosféricas, sendo 62% provenientes da combustão de biomassa.

Neste contexto, Puettmann; Oneil; Bergman (2013) determinaram as entradas e saídas de energia e materiais associadas à produção de madeira serrada na região Nordeste-Centro Norte da América do Norte. Segundo o ICV, 63% do combustível para consumo de energia foi proveniente de fontes renováveis e 32% de fontes não renováveis. A etapa de secagem consumiu a maior proporção de combustível, enquanto a serragem a maior proporção de eletricidade foi na produção de madeira serrada. A localização do estudo afetou o impacto ambiental deste produto, pois o carvão foi a matéria-prima mais utilizada para geração de energia elétrica na região.

Na Noruega, Tellnes; Nyrud; Flæte (2012) avaliaram a pegada de carbono dos produtos da indústria de serraria no país. A ACV considerou a

madeira serrada, subprodutos verdes e secos (casca, serragem e cavaco) e energia térmica. Os cálculos mostraram que o transporte e as operações florestais tiveram maior contribuição para a pegada de carbono no sistema. Além disso, o cenário de abordagem de carbono neutro na etapa de bioenergia florestal resultou em uma diminuição de 300% na pegada de carbono da madeira serrada.

Eshun; Potting; Leemans (2010a), Eshun; Potting; Leemans (2010b), Eshun; Potting; Leemans (2011) e Eshun; Potting; Leemans (2012) identificaram a minimização dos resíduos de madeira no sistema florestal e industrial como um importante ponto de partida para reduzir o impacto ambiental do setor madeireiro em Gana. Os resíduos de madeira incluíram, serragem, aparas, resíduos de moagem, cortes, árvores, galhos e cascas. Os resultados indicaram que a combinação de mudanças tecnológicas, boas práticas operacionais e medidas de reciclagem podem reduzir o desperdício de madeira em aproximadamente 50%. Este cenário mostrou ser eficaz para reduzir drasticamente o desperdício de madeira e conservação desse recurso natural (ESHUN; POTTING; LEEMANS, 2012).

Em relação ao sistema de produção e manejo florestal, de acordo com Dias (2014), esse é o estágio de maior contribuição para as categorias de impacto ambiental negativo no setor madeireiro. Contudo, os impactos dependem das características do cultivo florestal, tais como as mudas florestais, adubos e corretivos, defensivos (herbicidas e formicidas), combustíveis e lubrificantes, além das máquinas e equipamentos de plantio e colheita (SIMIONI et al., 2018). Nesse sentido, Murphy; Devlin; McDonnell (2014), Valente et al. (2014), De La Fuente et al. (2017) e Raghu et al. (2020) destacaram o transporte da área florestal até a indústria de madeiras como sendo a etapa de maior consumo de energia e emissão de GEE.

Em contrapartida, um ICV de energia incorporada, uso da água (MAY et al., 2012) insumos e emissões de GEE (ENGLAND et al., 2013) referente aos sistemas florestais para produção de madeira foram realizados na Austrália. Os resultados mostraram que o CO<sub>2</sub> total e as emissões associadas à produção e transporte de toras são pequenos em comparação com o conteúdo de carbono de uma tora média para fabricação de madeira serrada. Assim, as toras

entregues às serrarias representam estoques líquidos significativos de carbono e têm potencial para substituir materiais mais intensivos em emissão de GEE (MAY et al., 2012; ENGLAND et al., 2013).

De acordo com Adhikari; Ozarska (2018) os métodos de ACV podem proporcionar uma cobertura abrangente de diversos processos no setor de produção madeireiro, como consumo de energia, processo de fabricação e seus impactos no meio ambiente, sendo, as principais fontes de impactos ambientais dos produtos à base de madeira categorizadas em impactos físicos do processamento, uso de energia e emissões de GEE (ADHIKARI; OZARSKA, 2018).

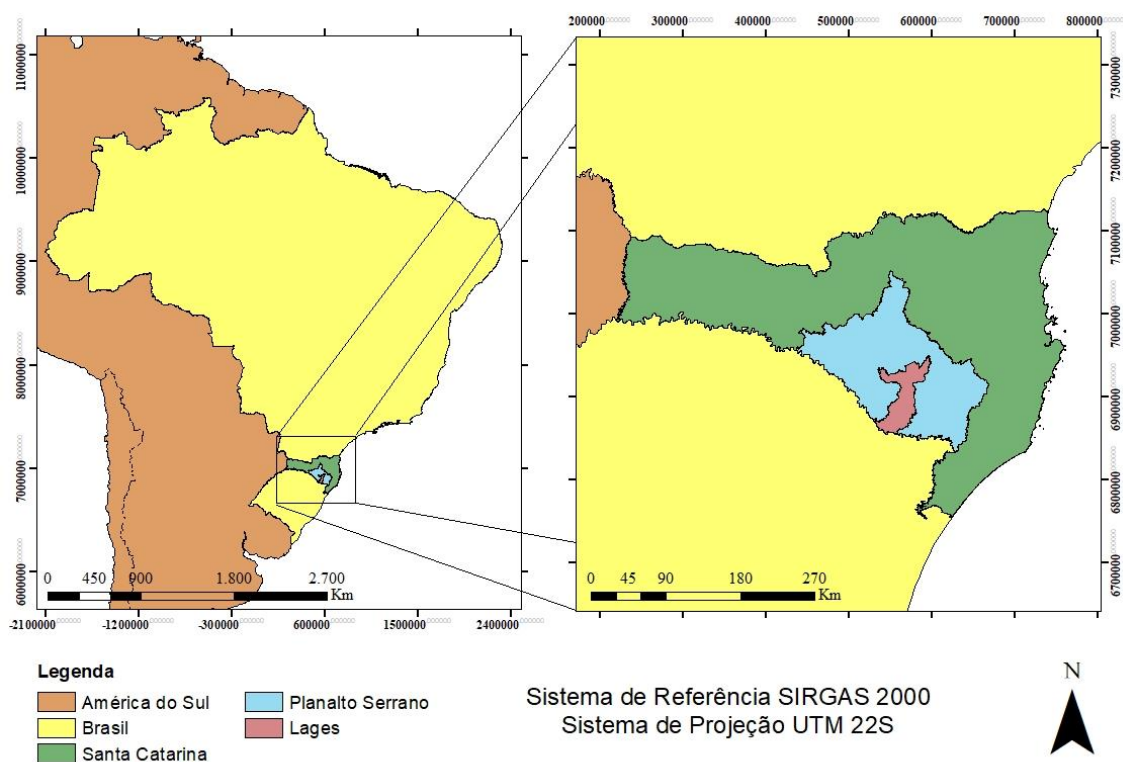
Os estudos citados anteriormente evidenciam os impactos ambientais por meio da ACV de uma série de produtos derivados da madeira serrada. A partir dessa revisão bibliográfica destaca-se o gargalo que existe em compreender melhor os aspectos e impactos ambientais do processamento de madeira serrada a nível nacional, a fim de complementar os resultados das ACVs de seus subprodutos.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido no município de Lages, localizado no planalto serrano do estado de Santa Catarina, Brasil (Figura 1). Esta região destaca-se economicamente no estado pelos setores madeireiro e de celulose e papel (SDS; SEBRAE, 2014). Além disso, a Associação Catarinense de Empresas Florestais - ACR (2019) aponta que os plantios de *Pinus* e *Eucalyptus* em Santa Catarina estão concentrados principalmente na região do planalto serrano, com destaque para os municípios de Lages, Santa Cecília e Otacílio Costa, que juntos detêm cerca de 90.000 ha (45%) dos 200.000 ha de área plantada no estado catarinense.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



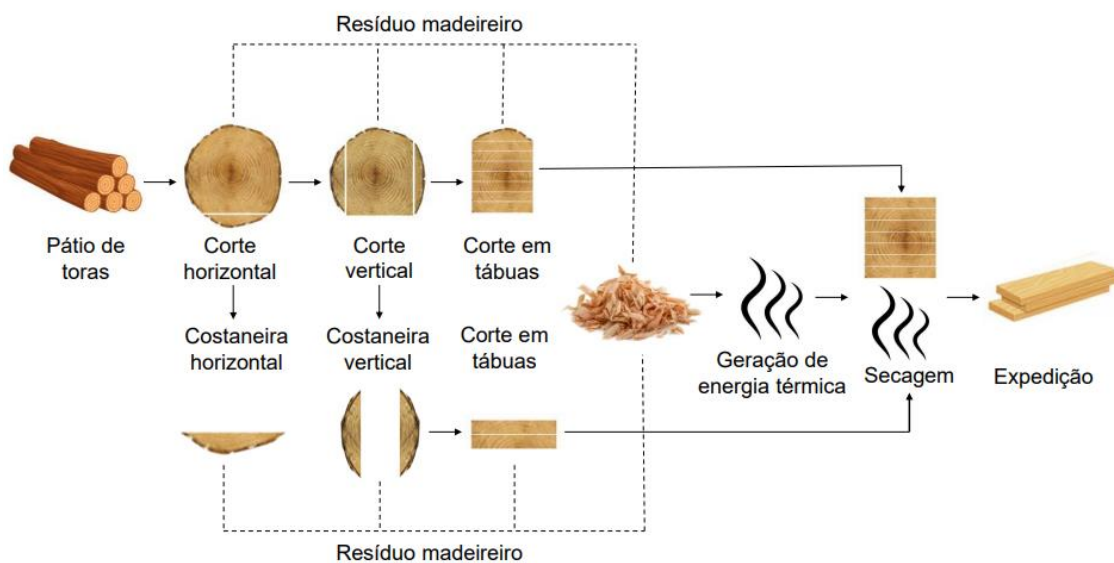
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

## 4.2 OBJETO DE ESTUDO

O cenário de estudo foi obtido com base em uma serraria de médio porte (CNI, 2019), destinada a produção de madeira serrada, além de uma indústria que elabora e fabrica equipamentos e serras para o setor madeireiro, ambas localizadas no município de Lages/SC. No primeiro semestre de 2021 foram realizadas visitas na serraria de forma a entender as etapas envolvidas no processamento de madeira serrada, bem como os fluxos de entrada e saída, de forma a compor o ICV do processo. A indústria de equipamentos e serras foi responsável por fornecer os dados de todos os maquinários envolvidos nas etapas do processo produtivo, contato este realizado no mesmo período de 2021 junto ao especialista responsável pelo projeto de maquinários na serraria estudada.

A serraria apresenta uma área total de aproximadamente 19000 m<sup>2</sup> com cerca de 105 colaboradores e produção média de 195 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup>. A empresa recebe diariamente 250 a 300 toneladas de toras da espécie *Pinus*, contabilizando 4000 toras no período diurno e 2000 toras no período noturno. O diâmetro médio das toras varia entre 22 e 28 cm, em sua maioria, além de toras menores que entram no sistema com diâmetro entre 16 e 20 cm. O diagrama de corte adotado no processo produtivo da serraria é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama de corte da serraria objeto de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As toras são armazenadas no pátio, sendo transportadas por carregadeiras até a esteira de toras, onde são unitizadas para o corte horizontal, passando a ser um semi-bloco. Na sequência, ocorre o corte vertical, o bloco formado é destopado, ou seja, cortado nas dimensões desejadas e encaminhado ao corte em tábuas. O corte horizontal e vertical geram as costaneiras que são reaproveitadas para formarem tábuas com dimensões menores, sendo refileadas em blocos, destopadas e cortadas em tábuas, assim como no processo principal.

Em paralelo, os resíduos madeireiros gerados em todo o processo são enviados ao picador, com exceção do cavaco e da serragem, sendo acondicionados no silo de biomassa com capacidade de armazenar 3000 m<sup>3</sup> ao mês. A caldeira é alimentada pela biomassa para geração de energia térmica, com produção máxima de vapor de 4000 kg.h<sup>-1</sup>. A energia térmica é utilizada para secagem das tábuas produzidas na etapa de corte. A estufa presente na serraria tem um rendimento que varia entre 2800 e 2700 m<sup>3</sup> de madeira seca mensal, a uma temperatura de 62 °C a 88 °C. Por fim, a madeira serrada seca é transportada por empilhadeiras para serem empacotadas na expedição e enviadas ao mercado consumidor. Em média são liberados 56 fardos com 240 peças de madeira serrada diariamente. A principal madeira serrada produzida

pela serraria apresenta em média 2 kg, 15 mm de espessura, 140 mm de largura e 1830 mm de comprimento.

#### 4.3 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo desta ACV é identificar e avaliar os aspectos e impactos ambientais do processamento de madeira serrada de uma serraria de médio porte no sul do Brasil, para tomadas de decisão no setor madeireiro. O escopo da ACV está descrito a seguir nos subitens 4.3.1 e 4.3.2.

##### 4.3.1 Unidade funcional e fluxo de referência

O estudo foi realizado considerando a produção de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada ao mercado consumidor como sendo a unidade funcional. Para tanto, são necessárias 12 unidades de madeiras em tora no processo fabril para garantir esse desempenho produtivo.

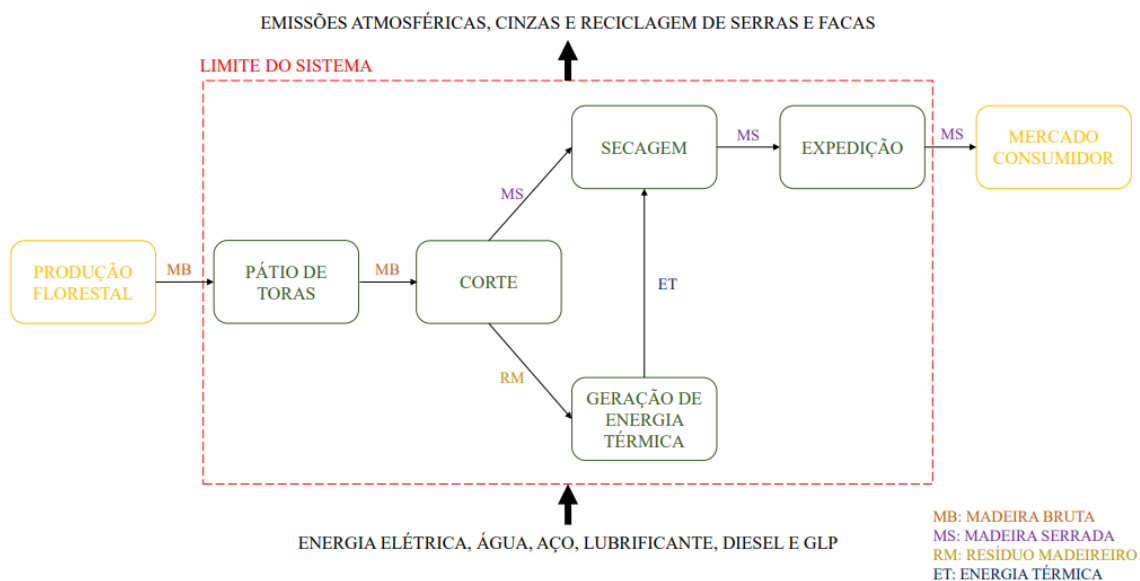
##### 4.3.2 Limites do sistema

O limite do sistema englobou as etapas de fabricação da madeira serrada na serraria, desde a entrada da madeira em tora no pátio até a produção final de madeira serrada empacotada e pronta para expedição ao mercado consumidor (Figura 3).

A abordagem do portão ao portão foi adotada neste estudo, considerando as etapas referentes ao pátio de toras, corte, geração de energia térmica, secagem e expedição, com insumos de matéria-prima, combustível, eletricidade, água, além de emissões e descartes ao longo do sistema (PUETTMANN; WAGNER; JOHNSON, 2010; MILOTA; PUETTMANN, 2017). Os limites do sistema detalhados com os processos e fluxos de entrada e saída são apresentados no Apêndice A.

Figura 3 - Limite do sistema do processo de madeira serrada.





Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

#### 4.3.2.1 Pátio de toras

A madeira em tora proveniente da etapa de produção florestal chega até a serraria por caminhões, que são encaminhados ao pátio de toras para pesagem em balança, controle fiscal e posterior armazenamento para uso como matéria-prima. As carregadeiras fazem a descarga da madeira em toras no local e as carregam até a esteira para entrada no processo de corte. A madeira bruta, o aço que compõe a balança e a carregadeira, além do diesel e lubrificante para transporte das toras são as entradas do processo, enquanto as emissões atmosféricas decorrentes da combustão do óleo diesel e a madeira bruta são as saídas.

#### 4.3.2.2 Corte

Ao entrar no processo, a madeira em toras é unitizada e posicionada por esteiras para o corte horizontal. Na sequência, o semi-bloco de tora é centralizado e passa pelo corte vertical, seguindo para o destopador, onde é feito os cortes nas cantoneiras, de acordo com o modelo de madeira serrada desejado (produto final). O bloco de tora é cortado em tábuas que são encaminhadas por esteiras até a pista de roletes para serem empilhadas. Em paralelo, as costaneiras do corte horizontal e vertical são refileadas, corte que torna a tábua simétrica, e assim seguem para o destopador. O bloco de

costaneiras é então, serrado em tábuas e encaminhado até a pista de roletes. Em alguns casos, as costaneiras após refiladas podem apresentar esmoado, característica que torna arredondado o canto da madeira, por isso, essa madeira é refilada novamente para retirar a imperfeição e seguir para o empilhamento. Essa etapa também é responsável pela produção dos resíduos madeiros (cavaco, serragem, cascas e costaneiras), que no decorrer de todo processo são coletados por esteiras e destinados ao silo de armazenagem. As costaneiras com cascas são encaminhadas pelas esteiras ao picador, para diminuição no tamanho de suas estruturas e, posteriormente, também são destinadas ao silo de armazenagem. Esses resíduos são utilizados como fonte de combustível renovável para geração de energia térmica ao processo de secagem. Como entrada dessa etapa têm-se a madeira bruta, energia elétrica, aço, diesel e lubrificante, proveniente do uso de maquinários, enquanto a saída é a madeira serrada úmida, resíduo madeireiro e a reciclagem das serras dos maquinários.

#### *4.3.2.3 Geração de energia térmica*

O resíduo madeireiro (biomassa – mistura de cavaco, casca e serragem) é enviado para a caldeira de biomassa, que funciona como combustível renovável à geração de calor para aquecimento da água. O vapor d'água resultante é destinado para o túnel de secagem. No processo de combustão há geração (saídas) de calor (energia térmica), cinzas e emissão atmosférica. As entradas desse processo são o resíduo madeireiro, energia elétrica, água e aço, proveniente do processamento do resíduo madeireiro e funcionamento da caldeira, além da reciclagem das facas do picador. As emissões biogênicas de CO<sub>2</sub> da combustão do resíduo madeireiro à geração de energia térmica foram consideradas neutras, pois se igualam ao CO<sub>2</sub> absorvido pela fotossíntese durante a fase da produção florestal (SILVA et al., 2013).

#### *4.3.2.4 Secagem*

Essa fase começa com as tábuas de madeira úmida montados em fardos na pista de roletes, as quais são transportados por empilhadeiras até o túnel de secagem. Os fardos de madeira são secos em diferentes pistas, com

maior e menor duração de tempo, por meio da energia térmica originada na caldeira de biomassa, com temperatura que varia de 62 °C a 88 °C. Entretanto, esse sistema utiliza energia elétrica para manter os motores da estufa funcionando em pleno rendimento. Por isso, as entradas são madeira serrada úmida, energia elétrica e o aço que compõem o túnel de secagem e a empilhadeira, além do diesel, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e lubrificante utilizados no transporte de carga, sendo a madeira serrada seca e as emissões atmosféricas pela combustão do diesel e GLP são as saídas deste processo.

#### 4.3.2.5 Expedição

Com a madeira serrada seca no final do túnel de secagem, as empilhadeiras transportam a carga até o pátio de expedição, onde o fardo é prensado, identificado e embalado para distribuição ao mercado consumidor. O aço, diesel, GLP e lubrificante são as entradas do processo, enquanto as emissões atmosféricas são as saídas decorrentes do uso e operação da empilhadeira, além da madeira serrada como produto final do processo produtivo.

#### 4.4 MULTIFUNCIONALIDADE DO SISTEMA (ALOCAÇÃO)

A indústria de serrarias apresenta alta multifuncionalidade em seu sistema, pois a fabricação de madeira serrada representa aproximadamente metade da produção, sendo as demais saídas, como serragem, casca e calor, coprodutos com valor agregado no processo produtivo (TELLNES; NYRUD; FLÆTE, 2012).

A multifuncionalidade desta ACV é definida pelo rendimento de produção da madeira serrada a partir da madeira em tora, sendo a madeira serrada o produto principal e o resíduo madeireiro o coproduto gerado no processo. Deste modo, foi adotado uma alocação mássica para dividir os fluxos de entradas e saídas de acordo com a multifuncionalidade do sistema. Assim, uma tora de madeira bruta rende 55% de madeira serrada e 45% de resíduo madeireiro (casca, serragem e cavaco), ou seja, para produzir 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada é necessário 1,82 m<sup>3</sup> de toras, sendo 0,82 m<sup>3</sup> de resíduos madeireiros gerados ao longo do processo produtivo.

Nos processos de fabricação de madeira serrada, geralmente, tem-se mais de um tipo de produto (produz-se tábuas com várias dimensões), ou seja, o produto principal que provém do bloco (tábuas de dimensões maiores) e o produto secundário proveniente do beneficiamento das costaneiras (tábuas de dimensões menores). Neste estudo, ambos os produtos foram tratados como madeira serrada, embora apresentem diferentes dimensões, de modo a evitar maiores alocações no sistema.

#### 4.5 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

Os dados primários do ICV foram coletados a partir de visitas à serraria com observações *in loco* do processo produtivo, registro de fotos e vídeos, além de dados técnicos fornecidos pela serraria e por uma indústria de equipamentos e serras. Já os dados de emissões atmosféricas dos processos de pátio de toras, secagem e expedição foram obtidos via *European Environment Agency* (2013). As entradas ao longo do processo foram a energia elétrica, água, aço, lubrificante, diesel e GLP. Por outro lado, emissões atmosféricas, cinzas e reciclagem de serras e facas foram as saídas. O tempo de vida útil para os equipamentos e maquinários a base de aço foi de 10 anos (RFB, 2017) e serras e facas de 5 dias. O Apêndice A apresenta os fluxos de entrada e saída em cada etapa do processamento.

Os dados foram levantados e compilados em planilhas eletrônicas, de forma que o dado bruto fosse convertido para unidade referência da ACV de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada processada para o mercado consumidor. Os dados secundários não disponíveis via objetos de estudo, foram selecionados na base de dados *ecoinvent* 3.7.1 acoplado ao *software* SimaPro 9.2.0.2, a qual contém cerca de 18.000 conjuntos de dados de ICV validados (ECOINVENT, 2021).

#### 4.6 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

Com o ICV completo, os dados foram modelados no *software* SimaPro 9.2.0.2 para determinar a AICV do processo de produção da madeira serrada. O método de impacto ambiental escolhido foi o ReCiPe 2016, nas categorias *midpoint*, intermediária as áreas de proteção e *endpoint*, consideradas áreas de proteção. O *midpoint* apresenta 18 categorias de impactos, sendo acidificação

terrestre (AT), aquecimento global (AG), consumo de água (CA), depleção do ozônio estratosférico (DOE), ecotoxicidade água doce (EcAD), ecotoxicidade marinha (EcM), ecotoxicidade terrestre (ET), escassez de recursos fósseis (ERF), escassez de recursos minerais (ERM), eutrofização de água doce (EuAD), eutrofização marinha (EuM), formação de ozônio, ecossistemas terrestres (FET), formação de ozônio, saúde humana (FSH), formação de partículas finas (FPF), radiação ionizante (RI), toxicidade humana cancerígena (THC), toxicidade humana não cancerígena (THNC) e uso da terra (UT). Enquanto isso, o *endpoint* apresenta 3 categorias, danos ao ecossistemas (DE), escassez de recursos (ER) e danos à saúde humana (DSH). Todas as categorias foram selecionadas para compor o AICV do processamento de madeira serrada. A perspectiva hierarquista no método ReCiPe 2016 foi adotada como o modelo para evitar danos futuros, sendo o padrão frequentemente encontrado em modelos científicos (PRÉ SUSTAINABILITY, 2016).

#### 4.7 CENÁRIO ALTERNATIVO DE SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL E GLP POR ENERGIA ELÉTRICA

A fabricação de madeira serrada apresenta insumo de diesel e GLP como combustíveis para o uso de carregadeira e empilhadeira ao longo do sistema produtivo, sendo fontes não-renováveis de energia. Assim, a modelagem de um cenário alternativo foi proposto de modo a substituir o uso dessas fontes por energia elétrica.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

O ICV do processamento de madeira serrada está descrito na Tabela 1, de acordo com seus respectivos processos, fluxos de entrada e saída convertidos à unidade funcional do sistema de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada produzida, além da fonte do dado obtido.

Tabela 1 - Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do processamento de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada.

		Quantidade	Unidade	Fonte
Entrada				
	Madeira bruta	1,82	m <sup>3</sup>	Entrevista
	Aço	191,58	g	Entrevista
	Diesel	31,50	g	Entrevista
	Lubrificante	1,81	g	Entrevista
Saída				
	Madeira bruta	1,82	m <sup>3</sup>	Entrevista
Pátio de toras	CH <sub>4</sub>	0,001	g	EEA (2013)
	CO	0,25	g	EEA (2013)
	CO <sub>2</sub>	99,54	g	EEA (2013)
	N <sub>2</sub> O	0,004	g	EEA (2013)
	NH <sub>2</sub>	0,0003	g	EEA (2013)
	COVNM <sup>1</sup>	0,064	g	EEA (2013)
	NO <sub>x</sub>	0,92	g	EEA (2013)
	MP <sub>10</sub> <sup>2</sup>	0,03	g	EEA (2013)
	MP <sub>2,5</sub> <sup>2</sup>	0,03	g	EEA (2013)
	PST <sup>3</sup>	0,03	g	EEA (2013)
Entrada				
	Madeira bruta	1,82	m <sup>3</sup>	Entrevista
	Energia elétrica	26,72	kWh	Entrevista
Corte	Aço	82,83	g	Entrevista
	Lubrificante	56,11	g	Entrevista
Saída				

		Quantidade	Unidade	Fonte
Geração de energia térmica	Madeira serrada úmida	1,00	m <sup>3</sup>	Entrevista
	Resíduo madeireiro	0,82	m <sup>3</sup>	Entrevista
	Serras	13,91	g	Entrevista
	Entrada			
	Resíduo madeireiro	0,48	m <sup>3</sup>	Entrevista
	Energia elétrica	16,34	kWh	Entrevista
	Aço	65,69	g	Entrevista
	Água	94,77	kg	Entrevista
	Saída			
	Energia térmica	492,31	kg	Entrevista
Resíduo madeireiro <sup>4</sup>	0,34	m <sup>3</sup>	Entrevista	
Cinzas	2,28	kg	Entrevista	
Facas	4,35	g	Entrevista	
CO <sub>2</sub> <sup>5</sup>	22,92	kg	Entrevista	
CO	0,30	kg	Entrevista	
NO	0,01	kg	Entrevista	
NO <sub>x</sub>	0,02	kg	Entrevista	
MP	31,18	kg	Entrevista	
Secagem	Entrada			
	Madeira serrada úmida	1,00	m <sup>3</sup>	Entrevista
	Energia térmica	492,31	kg	Entrevista
	Energia elétrica	14,94	kWh	Entrevista
	Aço	65,26	g	Entrevista
	Diesel	210,00	g	Entrevista
	GLP <sup>6</sup>	1,11	g	Entrevista
	Lubrificante	2,71	g	Entrevista
	Saída			
	Madeira serrada seca	1,00	m <sup>3</sup>	Entrevista
	CH <sub>4</sub>	0,007	g	EEA (2013)
	CO	1,65	g	EEA (2013)
	CO <sub>2</sub>	666,92	g	EEA (2013)
	N <sub>2</sub> O	0,03	g	EEA (2013)
	NH <sub>2</sub>	0,002	g	EEA (2013)
COVNM	0,43	g	EEA (2013)	

		Quantidade	Unidade	Fonte
	NOx	6,18	g	EEA (2013)
	MP <sub>10</sub>	0,21	g	EEA (2013)
	MP <sub>2,5</sub>	0,21	g	EEA (2013)
	PST	0,21	g	EEA (2013)
Entrada				
	Madeira serrada seca	1,00	m <sup>3</sup>	Entrevista
	Aço	6,25	g	Entrevista
	Diesel	210,00	g	Entrevista
	GLP	1,11	g	Entrevista
	Lubrificante	2,71	g	Entrevista
Saída				
	Madeira serrada	1,00	m <sup>3</sup>	Entrevista
Expedição	CH <sub>4</sub>	0,007	g	EEA (2013)
	CO	1,65	g	EEA (2013)
	CO <sub>2</sub>	666,92	g	EEA (2013)
	N <sub>2</sub> O	0,03	g	EEA (2013)
	NH <sub>2</sub>	0,002	g	EEA (2013)
	COVNM	0,43	g	EEA (2013)
	NOx	6,18	g	EEA (2013)
	MP <sub>10</sub>	0,21	g	EEA (2013)
	MP <sub>2,5</sub>	0,21	g	EEA (2013)
	PST	0,21	g	EEA (2013)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

<sup>1</sup>Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos; <sup>2</sup>Material Particulado com diâmetro inferior a 10 e 2,5 µm; <sup>3</sup>Partículas Suspensas Totais; <sup>4</sup>Resíduo madeireiro excedente para secagem de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada; <sup>5</sup>Carbono biogênico; <sup>6</sup>Gás Liquefeito de Petróleo.

O pátio de toras apresentou a maior contribuição de aço, devido ao alto peso desse metal na balança para pesagem presente no local, com aproximadamente 120 toneladas. Os processos de corte, geração de energia térmica e secagem possuem valores próximos de aquisição de aço, presentes nos equipamentos e maquinários que compõem essas etapas, como as máquinas de corte, caldeira e túnel de secagem, respectivamente. Na expedição esse metal participa apenas na composição de empilhadeiras.



Por outro lado, a quantidade de diesel no pátio de toras foi menor, com a utilização de carregadeiras, enquanto na secagem e expedição o valor foi superior com uso de empilhadeiras. Segundo dados da serraria, o tempo de viagem para transportar a unidade funcional é de 15 min e 10 min, para carregadeira e empilhadeira, respectivamente. Desta forma, percebe-se que o consumo de diesel é maior no transporte por empilhadeiras, embora o tempo de percurso seja menor, assim como visto no estudo de Puettmann; Oneil; Bergman (2013), onde a etapa de secagem apresentou o maior consumo de combustível.

O uso de GLP no processo é destinado ao transporte por empilhadeiras, sendo significativo nas etapas de secagem e expedição. O lubrificante (óleos e graxas) apresentaram alto consumo na etapa de corte, devido ao número de maquinários envolvidos nessa etapa, sendo o processo de manutenção fabril o que exige maior demanda de lubrificação. Além disso, o corte apresentou o maior consumo de energia elétrica, pelo alto número de maquinários em funcionamento ao longo do sistema, corroborando com o ICV realizado na América do Norte por Puettmann; Oneil; Bergman (2013) que apontou o corte como o maior consumidor de eletricidade na produção de madeira serrada. Os processos de secagem e geração de energia térmica também exigem eletricidade para funcionamento de motores e painel de controle, porém em níveis menores.

Em contrapartida, Puettmann; Wagner; Johnson (2010); Milota; Puettmann (2017) apontaram em um ICV do processamento da madeira serrada realizado nos Estados Unidos que os equipamentos utilizados nas etapas de acabamento e expedição consumiram a maior quantidade de energia elétrica (45%) em comparação aos processos de pátio de toras, serraria e secagem. Assim, o resultado do consumo de energia elétrica no processamento de madeira serrada é variável e dependerá do tipo de processo realizado, além da quantidade de equipamentos atuantes em cada etapa. No presente trabalho, a madeira serrada não recebe acabamento após a sua secagem.

Para produção de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada foi necessário 1,82 m<sup>3</sup> de toras de madeira, resultando em 0,82 m<sup>3</sup> de resíduo madeireiro oriundo do

corte, ou seja, a eficiência da serraria é de 55%. Buchholz et al. (2021) avaliaram o ciclo de vida do carbono do processamento de madeira serrada, de modo a representar o estado atual da indústria de processamento madeireiro na Califórnia. No estudo, a eficiência da serraria, ou seja, a taxa de conversão total da madeira serrada foi de 71%, com outros 9% armazenados em subprodutos duráveis, incluindo matéria-prima para papel e celulose. No Brasil, o estudo de Murara Junior; Rocha; Timofeiczuk Junior (2005) avaliou o rendimento em madeira serrada de *Pinus taeda* com duas diferentes metodologias de desdobro, no sistema convencional (sem classificação diamétrica para corte) o rendimento variou de 35,24% a 43,92%, e no desdobro otimizado (com classificação diamétrica para corte), de 41,65% a 63,04%.

Na caldeira, é necessário apenas 0,48 m<sup>3</sup> de resíduo madeireiro para suprir a demanda funcional de energia térmica do sistema, sendo 0,34 m<sup>3</sup> o excedente armazenado para posterior uso ou oferta ao mercado cogador de energia térmica. O calor produzido pela caldeira de biomassa é de 492,31 kg de vapor para secar 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada no túnel de secagem, consumindo 80% da água utilizada pela serraria.

A combustão do resíduo madeireiro resulta na formação de 2,28 kg de cinzas. Por se tratar de uma pequena quantidade, esse material é enviado ao aterro sanitário. Porém, as cinzas podem ser aplicadas no solo para neutralizar a acidificação e corrigir a deficiência de macronutrientes, como o Ca, P, K e Mg (AN; PARK, 2021). As serras e facas utilizadas nos maquinários de corte e picador são substituídas semanalmente após 20 afiações. O descarte desse material é feito em recicladoras de metais que realizam a reciclagem de 13,91 g e 4,35 g de aço, respectivamente, com destino para o mercado de sucatas.

As emissões atmosféricas no sistema são provenientes dos processos de pátio de toras, geração de energia térmica, secagem e expedição, assim como o ICV da produção de MDF elaborado por Puettmann; Oneil; Wilson (2013), onde as emissões tiveram origem nas áreas da caldeira, secagem e prensagem. No pátio, as maiores emissões são de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e CO pela combustão do diesel no transporte por carregadeiras das toras de madeira até o corte. Na secagem e expedição o uso de empilhadeira emite maiores concentrações de poluentes, comparado ao pátio, sendo o pátio de toras a

etapa que menos contribui para a emissão desses poluentes no meio. A geração de energia térmica, especificamente a operação da caldeira de biomassa, apresentou as maiores concentrações de poluentes emitidas para atmosfera pela combustão do resíduo madeireiro para geração de calor, com destaque para MP e CO<sub>2</sub>. O carbono neste caso é considerado biogênico, ou seja, emissão neutra, devido a absorção de CO<sub>2</sub> na etapa de produção florestal pela fotossíntese (SILVA et al., 2013).

## 5.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

### 5.2.1 Impactos nas categorias *midpoint* e *endpoint*

Os valores da AICV do processamento de fabricação da madeira serrada estão categorizados na Tabela 2, segundo a categoria de impacto e a respectiva unidade característica.

Tabela 2 - Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) do processamento de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada.

Categoria de impacto	Valor	Unidade
<i>Midpoint</i>		
Acidificação terrestre (AT)	2,19.10 <sup>-2</sup>	kg SO <sub>2</sub> eq
Aquecimento global (AG)	2,44	kg CO <sub>2</sub> eq
Consumo de água (CA)	0,11	m <sup>3</sup>
Depleção do ozônio estratosférico (DOE)	1,41.10 <sup>-6</sup>	kg CFC11eq
Ecotoxicidade água doce (EcAD)	0,82	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade marinha (EcM)	1,15	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade terrestre (ET)	3,48	kg 1,4-DCB
Escassez de recursos fósseis (ERF)	0,73	kg óleoeq
Escassez de recursos minerais (ERM)	1,75.10 <sup>-2</sup>	kg Cu <sub>eq</sub>
Eutrofização de água doce (EuAD)	5,05.10 <sup>-4</sup>	kg P <sub>eq</sub>
Eutrofização marinha (EuM)	5,92.10 <sup>-5</sup>	kg N <sub>eq</sub>
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres (FET)	5,23.10 <sup>-2</sup>	kg NO <sub>x</sub> eq
Formação de ozônio, saúde humana (FSH)	5,20.10 <sup>-2</sup>	kg NO <sub>x</sub> eq
Formação de partículas finas (FPF)	7,88.10 <sup>-3</sup>	kg PM <sub>2,5</sub> eq

Categoria de impacto	Valor	Unidade
Radiação ionizante (RI)	$5,31 \cdot 10^{-2}$	kBq Co-60 <sub>eq</sub>
Toxicidade humana cancerígena (THC)	2,47	kg 1,4-DCB
Toxicidade humana não cancerígena (THNC)	28,28	kg 1,4-DCB
Uso da terra (UT)	$6,48E \cdot 10^{-2}$	m <sup>2</sup> ocupação <sub>eq</sub>
<i>Endpoint</i>		
Danos ao ecossistema (DE)	$2,01 \cdot 10^{-8}$	sp.ano <sup>-1</sup>
Danos à saúde humana (DSH)	$2,19 \cdot 10^{-5}$	DALY
Escassez de recursos (ER)	0,30	USD2013

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As potenciais categorias de impacto ambiental foram toxicidade humana, ecotoxicidade, aquecimento global, escassez de recursos fósseis e consumo de água, similar aos resultados encontrados em uma ACV realizada na Malásia, onde o potencial de aquecimento global, acidificação, toxicidade humana, eutrofização e formação de foto-oxidante foram as categorias de maior impacto em um processo produtivo semelhante (RAMASAMY et al., 2015).

A categoria de aquecimento global sofreu influência direta da emissão de CO<sub>2</sub> de fontes fósseis nas etapas de secagem, expedição e no pátio de toras. Esse valor é atenuado pela emissão de carbono biogênico na geração de energia térmica. Além disso, a produção e transporte de matérias-primas, como aço, diesel, GLP e lubrificante requeridas no sistema intensificaram esse impacto. Em estudo com objetivos similares na Malásia, Ratnasingam et al. (2015) apontaram que a produção de madeira serrada em regiões tropicais apresentaram uma pegada de carbono mais alta em comparação com as de espécies não tropicais. A diferença observada pôde ser atribuída ao menor rendimento da serraria e a maior proporção de resíduos produzidos pelo setor madeireiro na região tropical.

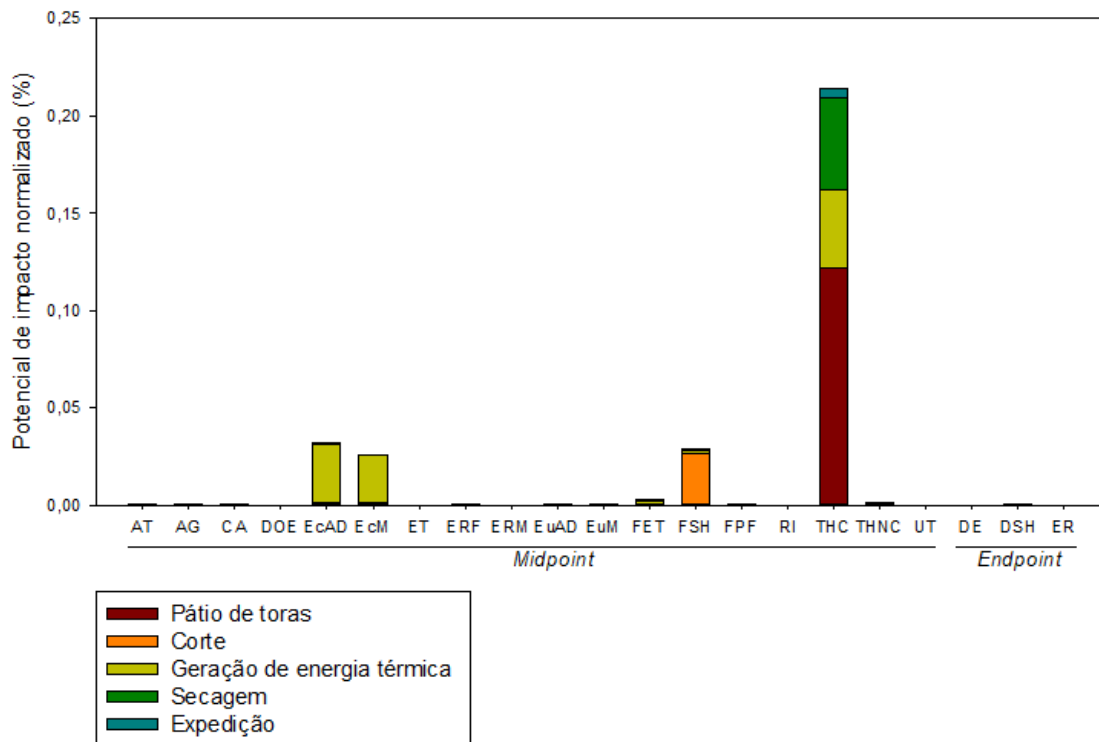
A depleção do ozônio estratosférico é uma categoria que apresenta baixo impacto devido a emissão pouco significativa de clorofluorcarbonos (CFCs) ao longo do processo produtivo, sendo esses gases provenientes da produção dos fluxos de entrada no sistema. O impacto de formação de partículas finas, está relacionado a emissão de MP no pátio de toras, secagem

e expedição, com destaque para geração de energia térmica com 31,18 kg de MP emitidos no ar atmosférico. Além disso, esse impacto é acrescido das emissões indiretas provenientes dos materiais que alimentam o processo produtivo. Em uma ACV do processamento de madeira serrada na Suíça, a combustão resultou nas maiores emissões atmosféricas de particulados (SUTER; STEUBING; HELLWEG, 2017).

O consumo de água (0,095 m<sup>3</sup>) abastece principalmente a caldeira de biomassa para a geração de energia térmica, além dos fluxos de entrada para funcionamento dos processos. O impacto nas categorias de eutrofização, formação de ozônio, acidificação e ecotoxicidade é influenciado pelas emissões atmosféricas na etapa de geração de energia térmica, de maneira indireta pelos poluentes CO, NO e NO<sub>x</sub> e diretamente pelo descarte de cinzas em aterros industriais.

O consumo de diesel, GLP e lubrificante nas etapas de pátio de toras, secagem e expedição é responsável pela intensificação do impacto de escassez de recursos fósseis, devido ao acesso às fontes não renováveis para produção desses materiais. O aço que constitui os maquinários do sistema apresenta uma cadeia de impactos ao longo de seu processo produtivo, influenciando diretamente na categoria de THC, devido aos poluentes emitidos no meio para produção deste metal. Essa categoria afeta diretamente o bem-estar e a saúde humana, explicando o fato de ser a mais significativa no processamento de madeira serrada (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Potencial de impacto do processamento de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada por categoria.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A quantidade de aço utilizado é maior na etapa de pátio de toras (191,58 g), devido à grande influência da balança para pesagem, seguido do maquinário de corte (82,83 g), estufa de secagem (65,26 g) e caldeira (65,69 g), nas etapas de corte, secagem e geração de energia térmica, respectivamente. A etapa de corte embora apresente uma quantidade maior de aço, comparado à secagem e geração de energia térmica, não emite poluentes atmosféricos em sua operação, por isso não é significativo na categoria THC. Por outro lado, a FSH é impactada pela lubrificação e não pelos poluentes atmosféricos emitidos nos demais processos. Nessa linha, embora a secagem possua um menor uso do aço em suas atividades comparado com a geração de energia térmica, essa etapa apresenta fontes de combustíveis fósseis que contribuem para o aumento dos impactos na categoria THC.

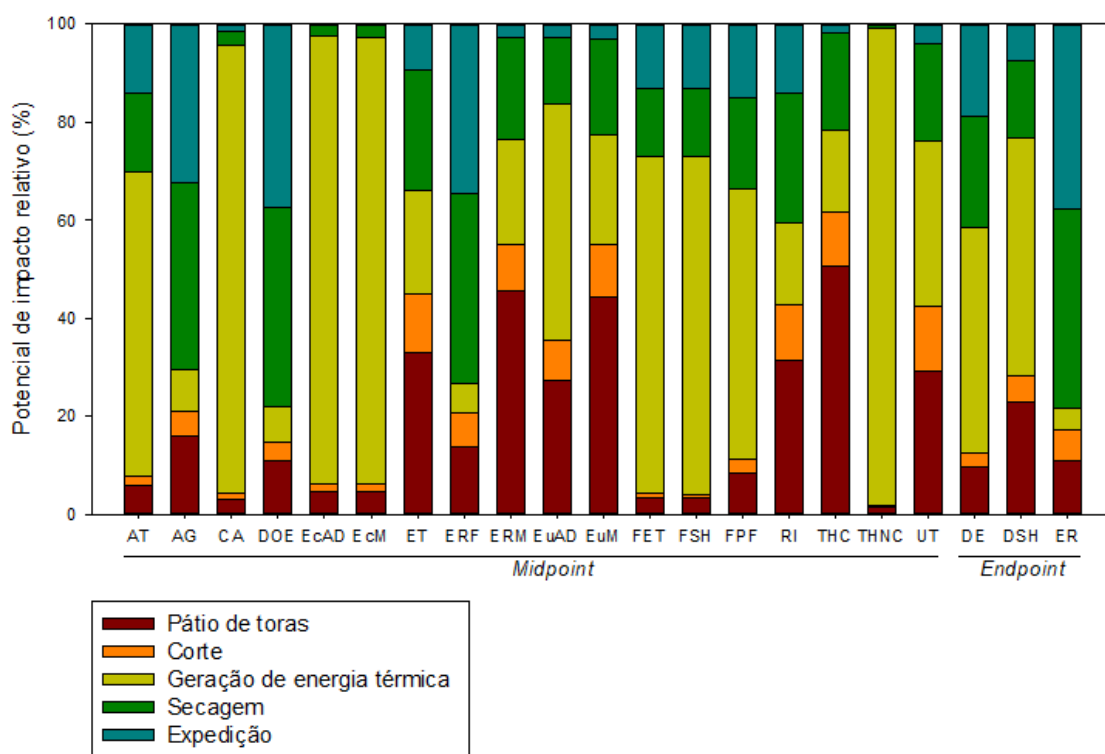
As categorias EcAD e EcM apresentaram maior relevância em relação as demais, com exceção da THC, devido as emissões de CO na etapa de geração de energia térmica. Esse poluente tóxico causa impactos diretamente em ambas as categorias.

Em relação as categorias *endpoint*, os danos ao ecossistema apresentaram baixo impacto às espécies de fauna e flora nos locais de exploração ambiental envolvidos na esfera do sistema. A escassez de recursos futuros leva em consideração a infraestrutura presente no sistema, assim como a aquisição de matéria-prima e insumos, como água e energia. O impacto à saúde humana é potencializado pelas emissões atmosféricas, com destaque ao CO, gás inodoro com alto grau de intoxicação, liberado em todas as etapas do sistema, com exceção do corte.

### 5.2.2 Hotspots ambientais

As etapas que compõem o processamento de madeira serrada que mais contribuíram para as categorias de impacto ambiental *midpoint* e *endpoint* estão expostas no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Hotspots ambientais do processamento de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada.



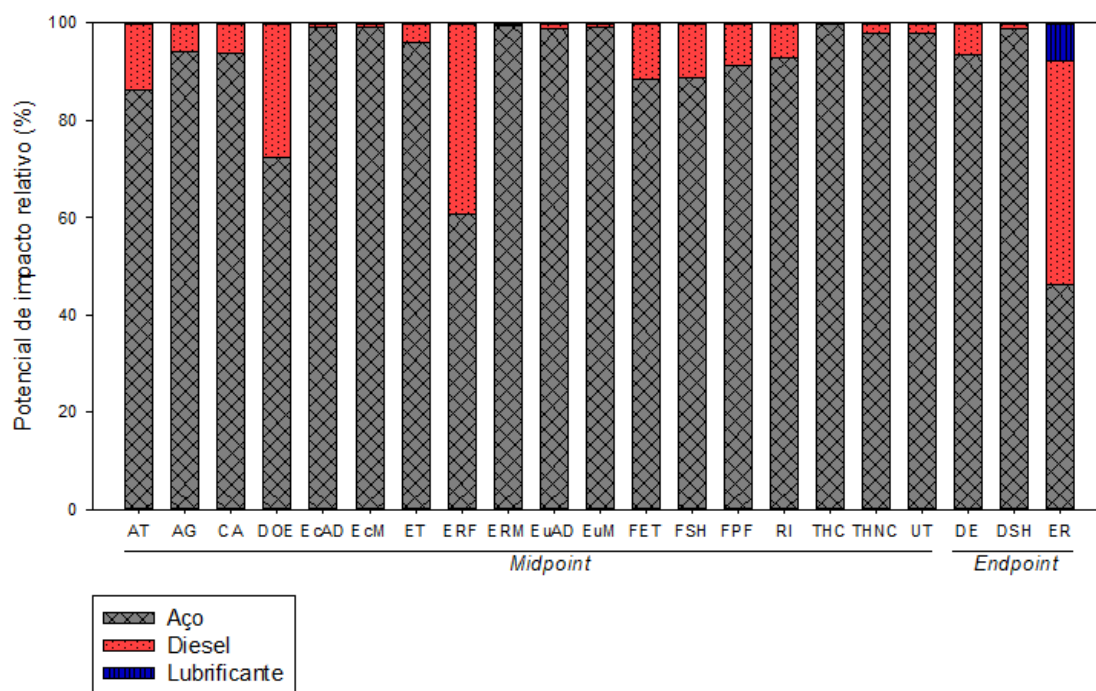
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O pátio de toras, geração de energia térmica e secagem foram os processos que mais contribuíram para o impacto ambiental nas categorias

analisadas. As categorias ET, ERM, EuM, RI e THC mais impactadas pelo pátio de toras, enquanto, AT, CA, EcAD, EcM, EuAD, FET, FSH, FPF, THNC, UT, DE pela geração de energia térmica e AG, DOE, ERF, DSH, ER pela secagem. Esse resultado está diretamente atrelado a entrada de aço e combustíveis de origem fóssil no sistema, além da saída de poluentes atmosféricos e resíduos (cinzas) nessas etapas do processo produtivo.

O aço foi o principal responsável pelos impactos no pátio de toras ( $\bar{x}$  = 90%), pois a balança para pesagem de toras e a carregadeira requerem uma grande quantidade desse metal como matéria-prima (Gráfico 3). O diesel e o lubrificante na operação representaram em média 10% dos impactos.

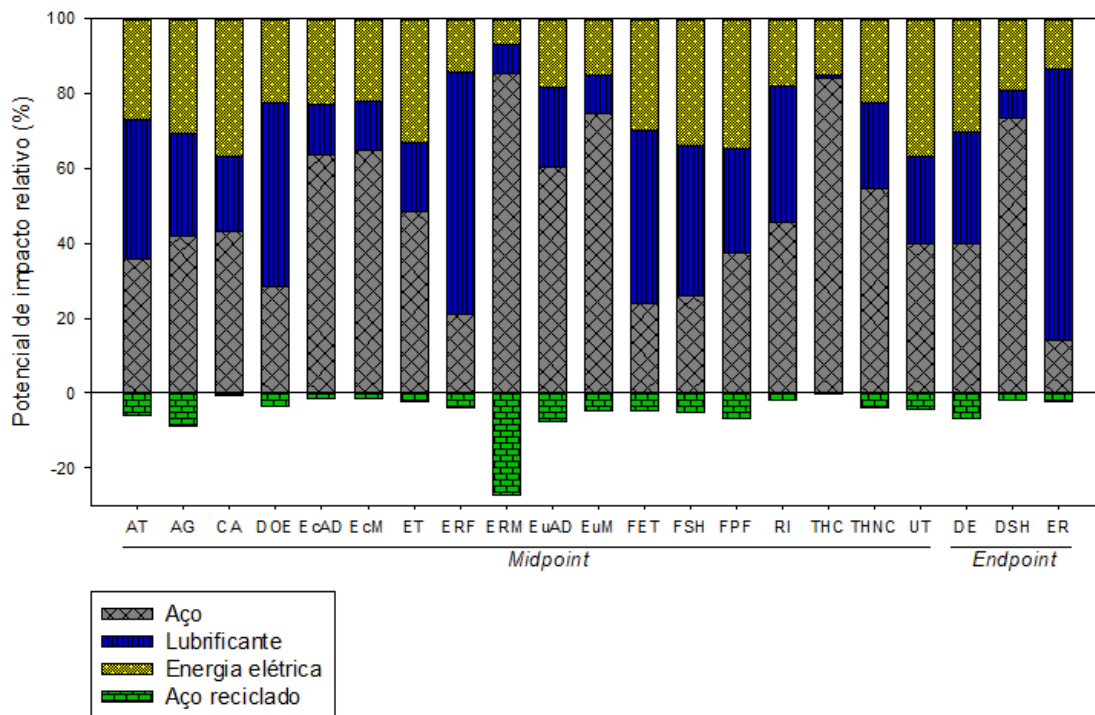
Gráfico 3 - Impacto do pátio de toras no processamento de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As principais contribuições da etapa de corte foram o aço da matéria-prima dos maquinários ( $\bar{x}$  = 48%), o impacto do uso de energia elétrica ( $\bar{x}$  = 29%) e a lubrificação das máquinas de corte ( $\bar{x}$  = 28%). As reciclagem das serras nessa etapa contribuíram para diminuição em 5% dos impactos no processo (Gráfico 4).



Gráfico 4 - Impacto do corte no processamento de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada.

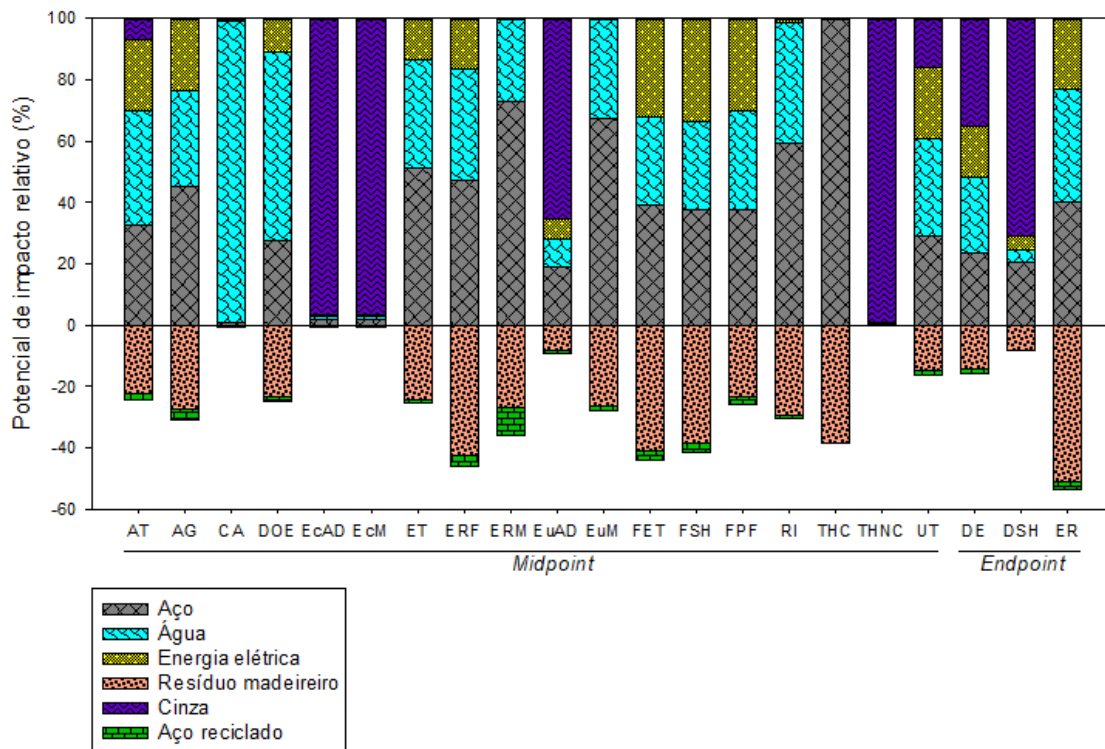
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A demanda de energia térmica no processamento foi alimentada 100% por biomassa residual, enquanto no estudo de Buchholz et al. (2021) esse valor foi de 82,3% sendo 2,4% derivado de combustíveis fósseis (gás natural). A maior influência no processo foi a emissão residual de cinzas pelo processo de queima do resíduo madeireiro ( $\bar{x} = 38\%$ ), seguido do aço utilizado como matéria-prima na caldeira de biomassa ( $\bar{x} = 36\%$ ), do consumo de água ( $\bar{x} = 30\%$ ) e do uso de energia elétrica ( $\bar{x} = 20\%$ ).

A reciclagem das facas do picador e o excedente de biomassa (0,34 kg) atenuaram os impactos ambientais em aproximadamente, 24% (Gráfico 5). Além disso, a maior emissão atmosférica no processo foi de CO<sub>2</sub>, considerado como carbono biogênico. Esse resultado corrobora com a ACV realizada na Suíça por Suter; Steubing; Hellweg (2017), onde o fornecimento de energia térmica causou pequenos impactos ambientais em termos de emissões de GEE. Tellnes; Nyrud; Flæte (2012) avaliaram a pegada de carbono nas serrarias da Noruega, onde o cenário de abordagem de carbono neutro na

etapa de bioenergia florestal resultou em uma diminuição de 300% na pegada de carbono da madeira serrada.

Gráfico 5 - Impacto da geração de energia térmica no processamento de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada.



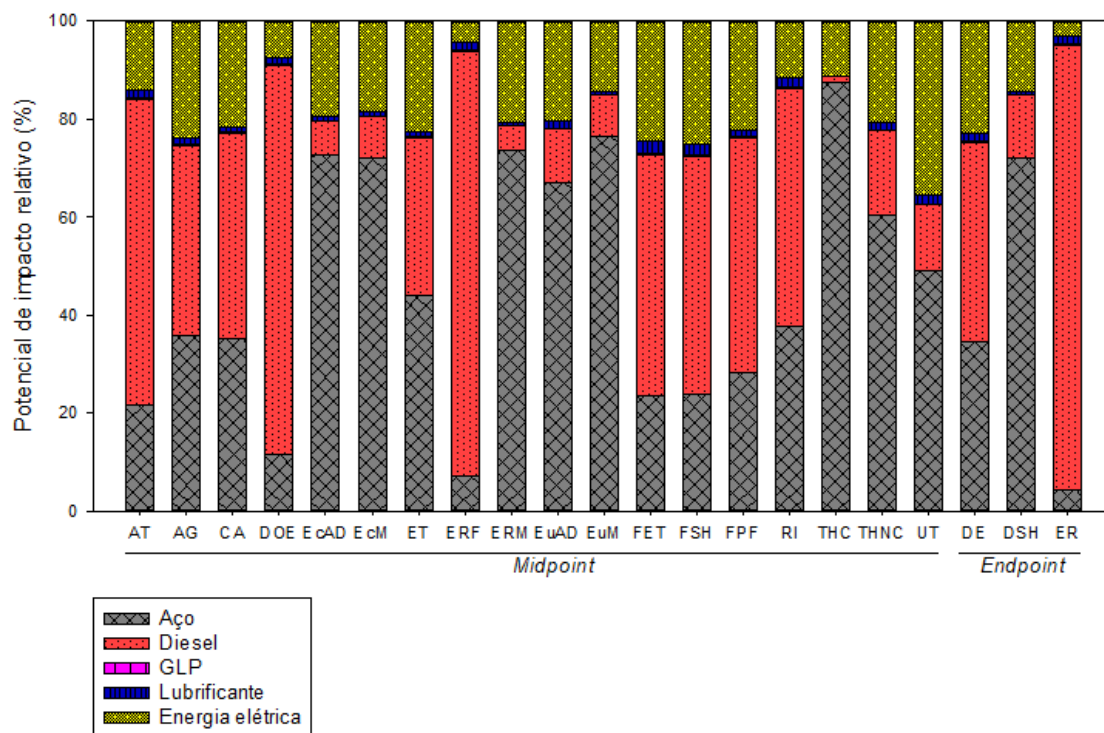
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De acordo com May et al. (2012); England et al. (2013) as toras entregues às serrarias representam estoques líquidos significativos de carbono e têm potencial para substituir materiais mais intensivos em emissão de GEE. Os resultados de Puettmann; Oneil; Bergman (2013) corroboram com esta ACV, quando determinaram as entradas e saídas de energia e materiais associadas à produção de madeira serrada na América do Norte. O estudo apontou o maior consumo de combustível na etapa de secagem, enquanto na serragem o maior consumo de energia elétrica foi proveniente dos maquinários de corte.

A secagem apresentou impactos significativos em sua etapa, devido ao aço presente na estufa de secagem ( $\bar{x} = 45\%$ ), pelo uso do diesel na operação

( $\bar{x} = 36\%$ ) e energia elétrica para funcionamento do túnel de secagem ( $\bar{x} = 18\%$ ). O GLP e o lubrificante apresentaram baixa influência nessa etapa, representando aproximadamente, 1% dos impactos (Gráfico 6).

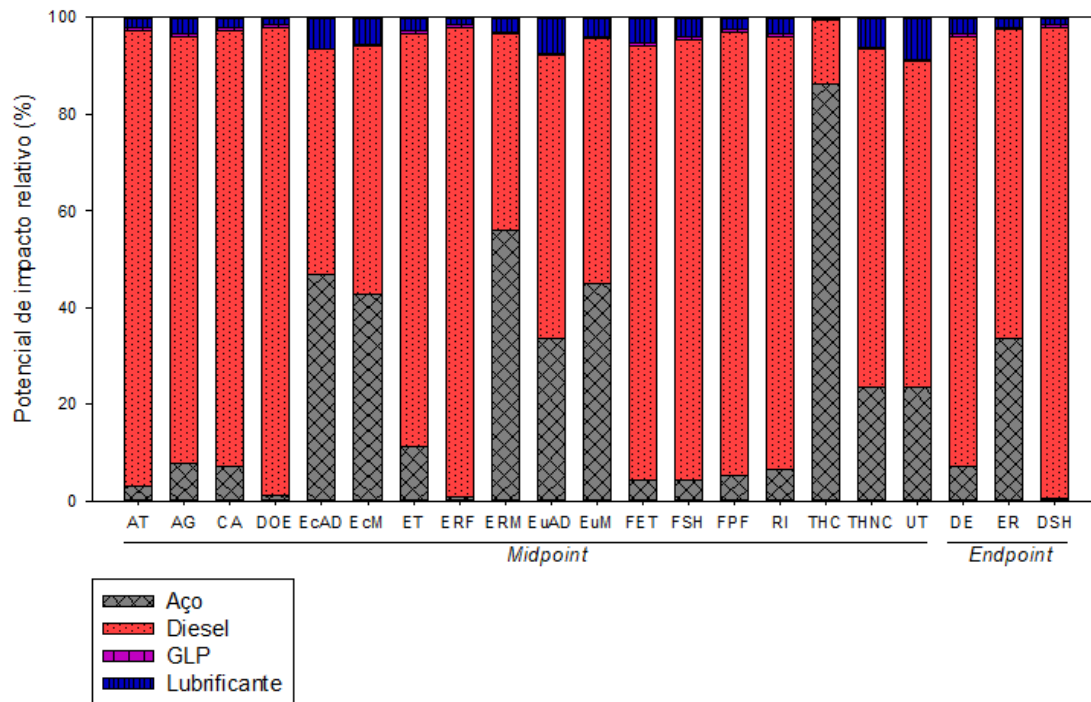
Gráfico 6 - Impacto da secagem no processamento de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A expedição teve a menor influência do aço no sistema como matéria-prima da empilhadeira, devido ao menor peso desse equipamento comparado aos demais. O impacto da utilização desse metal foi de 21%, sendo a maior contribuição neste processo o uso de diesel ( $\bar{x} = 74\%$ ) para o transporte da madeira serrada empacotada do túnel de secagem ao pátio da expedição (Gráfico 7). O GLP e a lubrificação foram responsáveis por 4% dos impactos na operação.

Gráfico 7 - Impacto da expedição no processamento de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Esse resultado diverge do ICV do processamento de madeira serrada realizado nos Estados Unidos, onde os equipamentos utilizados na expedição consumiram a maior quantidade de energia elétrica (45%) em comparação com os processos de pátio de toras, serraria e secagem (PUETTMANN; WAGNER; JOHNSON, 2010; MILOTA; PUETTMANN, 2017).

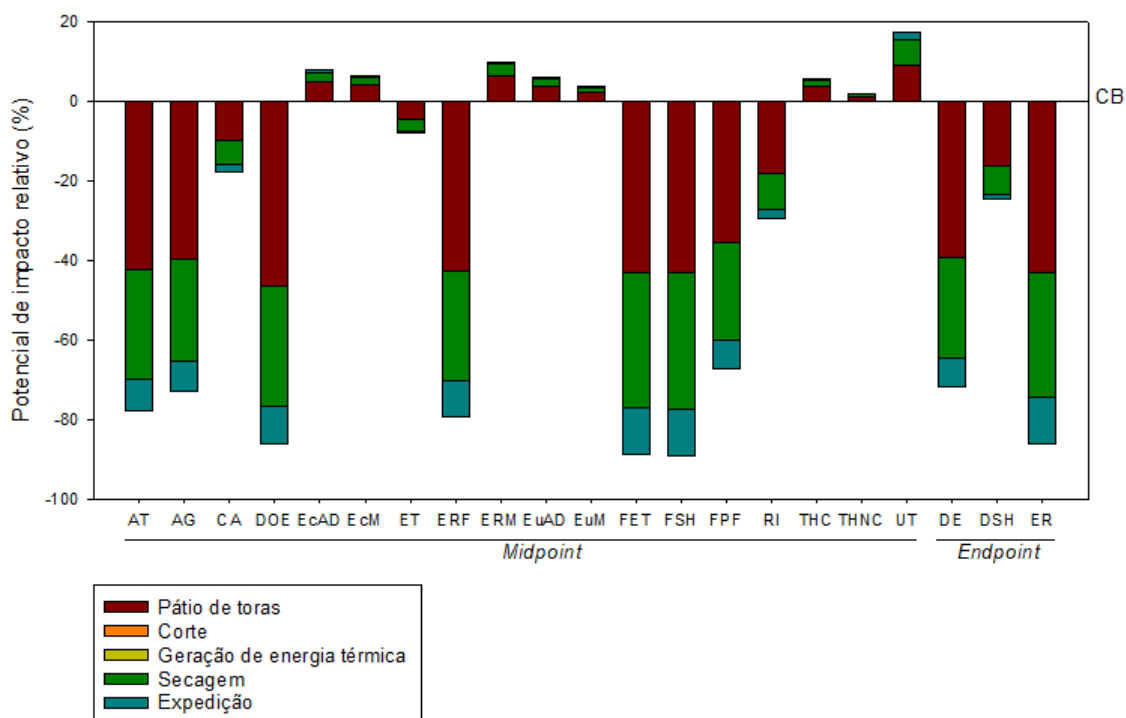
O aço foi o fluxo de entrada presente em todos os processos de fabricação da madeira serrada com grande influência ao longo do AICV. Em média, 48% dos impactos as categorias *midpoint* e *endpoint* podem ser atribuídas ao uso desse metal como matéria-prima dos equipamentos e maquinários ao longo do processo de fabricação de madeira serrada. Ramasamy et al. (2015) avaliou o desempenho ambiental do setor de serraria na Malásia pela ACV. O limite do sistema do portão ao portão, não incluiu os dados de maquinários. Desta forma, as emissões mais significativas no processo foram CO<sub>2</sub> seguido pelo SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e CO. Esses resultados, justificam a importância de analisar as matérias-primas envolvidas ao longo do ciclo de vida do processo produtivo da madeira serrada, pois sua incorporação no sistema foi significativa para os resultados da AICV, corroborando para maior precisão da ACV desenvolvida.

Segundo Adhikari; Ozarska (2018) a ACV pode proporcionar uma cobertura abrangente de diversos processos no setor de produção madeireiro, como consumo de energia, processo de fabricação e seus impactos no meio ambiente, sendo, as principais fontes de impactos ambientais dos produtos à base de madeira categorizadas em impactos físicos do processamento, uso de energia e emissões de GEE (ADHIKARI; OZARSKA, 2018).

### 5.2.3 Cenário alternativo de substituição do diesel e GLP por energia elétrica

O processamento de madeira serrada apresenta consumo de diesel e GLP para operação da carregadeira e empilhadeira nas etapas de pátio de toras, secagem e expedição. Esses combustíveis de fonte fóssil apresentaram impactos significativos ao longo do processo, devido a emissão de poluentes atmosféricos. Desta forma, o Gráfico 8 apresenta os impactos do processamento da madeira serrada a partir da substituição do diesel e GLP como combustíveis, cenário base (CB), pelo uso de energia elétrica para alimentação de ambos os maquinários.

Gráfico 8 - Impacto da substituição do diesel e GLP por energia elétrica no processamento de 1 m<sup>3</sup> de madeira serrada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O cenário alternativo, reduziu em 1,5 kgCO<sub>2eq</sub>, 0,5 kgóleo<sub>eq</sub>, e 0,2 USD2013 o impacto nas categorias de AG, ERF e ER, respectivamente. As categorias UT e ERM aumentaram seus impactos em 17% e 10% após a substituição, devido ao consumo de energia elétrica contribuir diretamente para o aumento desses impactos.

Os impactos ambientais sofreram atenuações significativas, em média essas diferenças foram de -18% no pátio de toras, -13% na secagem e -4% na expedição. As etapas de corte e geração de energia térmica não sofreram alterações, pois não se utiliza diesel e GLP como combustíveis nesses processos. Por outro lado, o pátio de toras foi a etapa que sofreu a maior diminuição de impactos no novo cenário. Esse resultado está atrelado ao consumo de energia elétrica pela carregadeira ser menor comparado a empilhadeira, com isso menos energia elétrica é necessária para operação do maquinário, contribuindo para o menor impacto quando comparado aos resultados da secagem e expedição.

Nesse sentido, Leino et al. (2016) e Kawata et al. (2012) objetivaram a redução das emissões de GEE e a economia na produção de energia elétrica renovável em serrarias, a partir de alternativas tecnológicas como a geração de eletricidade por um turbogerador hermético (TGH) e um processo de secagem híbrido, o qual combina secagem a vapor com um processo dielétrico de micro-ondas. Deste modo, segundo Leino et al. (2016) as reduções de emissões de GEE poderiam ser alcançadas com o sistema alternativo. Enquanto, Kawata et al. (2012) apontaram a capacidade de redução de emissões de CO<sub>2</sub> em 0,215 milhões de toneladas pelo sistema de secagem híbrido.

Diante disso, o uso de energia elétrica para realizar as mesmas operações desempenhadas por carregadeiras e empilhadeiras que usam diesel em serrarias é uma alternativa viável do ponto de vista ambiental. A viabilidade é ainda maior no caso brasileiro, uma vez que as fontes de energia elétrica são aproximadamente, 85% renováveis, sendo a energia hídrica responsável por cerca de 64% desse total, conforme evidenciado pela *Internacional Energy Agency* (IEA, 2021).

O ICV do processamento da madeira serrada do portão ao portão elaborado por Puettmann; Wagner; Johnson (2010) e Milota; Puettmann (2017) nos Estados Unidos apontou que mais de 70% da energia utilizada nos limites do sistema foi proveniente de fontes renováveis e menos de 30% de fontes não renováveis. Há um aumento no uso de fontes de energia elétrica renovável nos últimos anos, segundo balanço da *Internacional Energy Agency* o ano de 2021 apresentou valores significativos para fonte de energia por biocombustíveis (9,5%), eólica (9,2%), residual (0,4%) e solar (1,7%), diferente dos anos anteriores (IEA, 2021).

## 6 CONCLUSÃO

O presente estudo quantificou e analisou os aspectos e impactos ambientais do processamento de madeira serrada no sul do Brasil pela ACV. O pátio de toras apresentou a maior contribuição de uso do aço e o menor insumo de diesel no sistema. A geração de energia térmica, especificamente a operação da caldeira de biomassa, apresentou as maiores concentrações de poluentes emitidas no ar atmosférico.

As categorias de maior impacto ambiental ao longo do processo produtivo foram toxicidade humana, ecotoxicidade, aquecimento global, escassez de recursos fósseis e consumo de água. O potencial de aquecimento global sofreu influência direta da emissão de CO<sub>2</sub> fóssil nas etapas de pátio de toras, secagem e expedição. Os *hotspots* ambientais do sistema foram o pátio de toras, geração de energia térmica e secagem.

Como alternativa tecnológica, o uso de energia elétrica como fonte de alimentação de carregadeiras e/ou empilhadeiras é uma alternativa ambientalmente viável para diminuir os impactos ambientais do processamento de madeira serrada nas serrarias brasileiras.

Assim, recomenda-se como futuros estudos englobar a avaliação de aspectos e impactos ambientais de outros diagramas de corte realizados nas serrarias do Brasil, de modo a obter um perfil de desempenho ambiental dos produtos à base de madeira serrada a nível nacional, que servirá como diagnóstico para tomada de decisão acerca da mitigação dos impactos ambientais desse processo produtivo no país.



## REFERÊNCIAS

ADHIKARI, S.; OZARSKA, B. Minimizing environmental impacts of timber products through the production process “From Sawmill to Final Products”. **Environmental Systems Research**, v. 7, n. 1, 2018.

AN, J. Y.; PARK, B. B. Effects of wood ash and N fertilization on soil chemical properties and growth of *Zelkova serrata* across soil types. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1–13, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO CATARINENSE DE EMPRESAS FLORESTAIS - ACR. **Anuário Estatístico de Base Florestal para o estado de Santa Catarina 2019 (Ano Base 2018)**. Disponível em: <[http://www.acr.org.br/uploads/biblioteca/Anuario\\_ACR\\_2019\\_atualizado.pdf](http://www.acr.org.br/uploads/biblioteca/Anuario_ACR_2019_atualizado.pdf)>. Acesso em: 12 nov. 2021.

BERGMAN, R. Drying and Control of Moisture Content and Dimensional Changes. In: **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison, WI: U.S Department of Agriculture, Forest Service, 2010. p. 13,1-13,20.

BERGMAN, R. D.; ALANYA-ROSENBAUM, S. Cradle-to-gate life-cycle assessment of laminated veneer lumber production in the United States. **Forest Products Journal**, v. 67, n. 5–6, p. 343–354, 2017.

BOLIN, C. A.; SMITH, S. Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6–7, p. 620–629, 2011a.

BOLIN, C. A.; SMITH, S. T. Life cycle assessment of borate-treated lumber with comparison to galvanized steel framing. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6–7, p. 630–639, 2011b.

BUCHHOLZ, T. et al. Carbon life cycle assessment on california-specific wood products industries: Do data backup general default values for wood harvest and processing?. **Forests**, v. 12, n. 2, p. 1–9, 2021.

CHEN, C. X.; PIEROBON, F.; GANGULY, I. Life Cycle Assessment (LCA) of Cross-Laminated Timber (CLT) produced in Western Washington: The role of logistics and wood species mix. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 5, 2019.

CHEN, J. et al. Assessing the greenhouse gas effects of harvested wood products manufactured from managed forests in Canada. **Forestry**, v. 91, n. 2, p. 193–205, 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. **Perfil da**

**Indústria nos Estados.** Disponível em: <<https://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br/estado/sc>>.

DE LA FUENTE, T. et al. Fuel consumption and GHG emissions of forest biomass supply chains in Northern Sweden: a comparison analysis between integrated and conventional supply chains. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 32, n. 7, p. 568–581, 2017.

DIAS, A. C. Life cycle assessment of fuel chip production from eucalypt forest residues. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 3, p. 705–717, 2014.

ECOINVENT. **ecoinvent Database.** Disponível em: <<https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

ENGLAND, J. R. et al. Cradle-to-gate inventory of wood production from Australian softwood plantations and native hardwood forests: Carbon sequestration and greenhouse gas emissions. **Forest Ecology and Management**, v. 302, p. 295–307, 2013.

ESHUN, J. F.; POTTING, J.; LEEMANS, R. Inventory analysis of the timber industry in Ghana. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 7, p. 715–725, 2010a.

ESHUN, J. F.; POTTING, J.; LEEMANS, R. Sustainability of forestry and timber industry in Ghana. **International Forestry Review**, v. 12, n. 4, p. 383–395, dez. 2010b.

ESHUN, J. F.; POTTING, J.; LEEMANS, R. LCA of the timber sector in Ghana: Preliminary life cycle impact assessment (LCIA). **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n. 7, p. 625–638, 2011.

ESHUN, J. F.; POTTING, J.; LEEMANS, R. Wood waste minimization in the timber sector of Ghana: A systems approach to reduce environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 26, p. 67–78, 2012.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY - EEA. **EMEP/EEA air pollutant emission inventory.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.

GONG, X. et al. Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing: A comparative study. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. 4, p. 576–587, 2012.

GUO, H. et al. Energy saving and carbon reduction in the operation stage of cross laminated timber residential buildings in China. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 2, p. 1–17, 2017a.

GUO, H. et al. A Comparison of the energy saving and carbon reduction performance between reinforced concrete and cross-laminated timber structures in residential buildings in the severe cold region of China.

**Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 8, 2017b.

HEIDARI, M. D. et al. Streamlined life cycle assessment of an innovative bio-based material in construction: A case study of a phase change material panel. **Forests**, v. 10, n. 2, p. 1–16, 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual IBÁ - 2021**. São Paulo: 2021, 2021.

IWASE, T. et al. Environmental and economic evaluation of small-scale bridge repair using cross-laminated timber floor slabs. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 8, 2020.

JIA, L. et al. Life cycle assessment of plywood manufacturing process in China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 11, 2019.

KAWATA, T. et al. Life Cycle Analysis of Lumber Drying System with the Application of Microwave Dielectric Heat. **Journal of International Council on Electrical Engineering**, v. 2, n. 4, p. 397–402, 2012.

KOUCHAKI-PENCHAH, H. et al. Life cycle assessment of medium-density fiberboard manufacturing process in Islamic Republic of Iran. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 351–358, 2016.

LAN, K. et al. Dynamic life cycle carbon and energy analysis for cross-laminated timber in the Southeastern United States. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 12, 2019.

LEINO, M. et al. Economics and greenhouse gas balance of distributed electricity production at sawmills using hermetic turbogenerator. **Renewable Energy**, v. 88, p. 102–111, 2016.

LIANG, S.; GU, H.; BERGMAN, R. Environmental life-cycle assessment and life-cycle cost analysis of a high-rise mass timber building: A case study in Pacific Northwestern United States. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 14, 2021.

LU, H. R. et al. A comparative life cycle assessment (LCA) of alternative material for Australian building construction. **MATEC Web of Conferences**, v. 120, p. 1–9, 2017.

LU, H. R.; EL HANANDEH, A.; GILBERT, B. P. A comparative life cycle study of alternative materials for Australian multi-storey apartment building frame constructions: Environmental and economic perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 458–473, 2017.

MAY, B. et al. Cradle-to-gate inventory of wood production from Australian softwood plantations and native hardwood forests: Embodied energy, water use and other inputs. **Forest Ecology and Management**, v. 264, p. 37–50, 2012.

MILOTA, M.; PUETTMANN, M. E. Life-Cycle Assessment for the Cradle-to-Gate Production of Softwood Lumber in the Pacific Northwest and Southeast Regions. **Forest Products Journal**, v. 67, n. 5–6, p. 331–342, 2017.

MURALIKRISHNA, I. V.; MANICKAM, V. Life Cycle Assessment. In: **Environmental Management**. Elsevier, 2017. p. 57–75.

MURARA JUNIOR, M. I.; ROCHA, M. P. DA; TIMOFEICZYK JUNIOR, R. Rendimento em Madeira Serrada de Pinus taeda para duas metodologias de desdobro. **FLORESTA**, v. 35, n. 3, p. 473–483, 2005.

MURPHY, F.; DEVLIN, G.; MCDONNELL, K. Forest biomass supply chains in Ireland: A life cycle assessment of GHG emissions and primary energy balances. **Applied Energy**, v. 116, n. 2014, p. 1–8, 2014.

NAKANO, K.; KARUBE, M.; HATTORI, N. Environmental impacts of building construction using cross-laminated timber panel construction method: A case of the research building in Kyushu, Japan. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 6, p. 1–14, 2020.

PADILLA-RIVERA, A.; AMOR, B.; BLANCHET, P. Evaluating the link between low carbon reductions strategies and its performance in the context of climate Change: A carbon footprint of a wood-frame residential building in Quebec, Canada. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 8, p. 1–20, 2018.

PANAMEÑO, R. et al. Cleaner production and LCA as complementary tools in environmental assessment: Discussing tradeoffs assessment in a case of study within the wood sector in Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 18, 2019.

PRÉ SUSTAINABILITY. **ReCiPe**. Disponível em: <<https://pre-sustainability.com/articles/recipe/>>. Acesso em: 10 set. 2021.

PUETTMANN, M. E.; WAGNER, F. G.; JOHNSON, L. Life cycle inventory of softwood lumber from the inland northwest us. **Wood and Fiber Science**, v. 42, n. SUPPL. 1, p. 52–66, 2010.

PUETTMANN, M.; ONEIL, E.; BERGMAN, R. Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Softwood Lumber Production from the Northeast-North Central. p. 1–35, 2013.

PUETTMANN, M.; ONEIL, E.; WILSON, J. Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Composite I-Joists Production from the Southeast. p. 1–43, 2013.

PUETTMANN, M.; SINHA, A.; GANGULY, I. Life cycle energy and environmental impacts of cross laminated timber made with coastal douglas-fir. **Journal of Green Building**, v. 14, n. 4, p. 17–33, 2019.

RAGHU, K. C. et al. Lifecycle assessment of biomass supply chain with the assistance of agent-based modelling. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12,

n. 5, p. 1–14, 2020.

RAMASAMY, G. et al. Assessment of environmental emissions from sawmilling activity in Malaysia. **BioResources**, v. 10, n. 4, p. 6643–6662, 2015.

RATNASINGAM, J. et al. An assessment of the carbon footprint of tropical hardwood sawn timber production. **BioResources**, v. 10, n. 3, p. 5159–5173, 2015.

RFB - RECEITA FEDERAL DO BRASIL. **INSTRUÇÃO NORMATIVA RFB Nº 1700, DE 14 DE MARÇO DE 2017**, 2017. Disponível em: <<http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/link.action?visao=compilado&idAto=81268#1706802>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

ROBERTSON, A. B.; LAM, F. C. F.; COLE, R. J. A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: Laminated timber or reinforced concrete. **Buildings**, v. 2, n. 3, p. 245–270, 2012.

SAHOO, K. et al. Life Cycle Assessment of Forest-Based Products: A Review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 17, p. 1–30, 2019.

SDS - SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL DE SANTA CATARINA; SEBRAE - SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS DE SANTA CATARINA. **Estudo Setorial da Indústria Madeireira de Santa Catarina**. Disponível em: <[http://promo.sebrae-sc.com.br/industria\\_madeira\\_de\\_santa\\_catarina](http://promo.sebrae-sc.com.br/industria_madeira_de_santa_catarina)>. Acesso em: 26 ago. 2020.

SILVA, D. A. L. et al. Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 7, p. 1404–1411, 2013.

SIMIONI, F. J. et al. Cadeia produtiva de energia de biomassa florestal: O caso da lenha de eucalipto no polo produtivo de itapeva - SP. **Ciencia Florestal**, v. 28, n. 1, p. 310–323, 2 abr. 2018.

SUTER, F.; STEUBING, B.; HELLWEG, S. Life Cycle Impacts and Benefits of Wood along the Value Chain: The Case of Switzerland. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 4, p. 874–886, 2017.

TELLNES, L.; NYRUD, A. Q.; FLÆTE, P. O. Carbon footprint of products from the Norwegian sawmilling industry. **Proceedings of the Biennial Meeting of the Scandinavian Society of Forest Economics**, n. 44, p. 152–167, 2012.

TSANG, M. P. et al. Benefits and risks of emerging technologies: Integrating life cycle assessment and decision analysis to assess lumber treatment alternatives. **Environmental Science and Technology**, v. 48, n. 19, p. 11543–11550, 2014.

VALENTE, C. et al. Mountain forest wood fuel supply chains:

Comparative studies between Norway and Italy. **Biomass and Bioenergy**, v. 71, n. 2480, p. 370–380, 2014.

WANG, H.; WU, J.; CHEN, Z. Carbon Footprint Accounting and Low-Carbon Path Optimization for Imported Timber-based Wooden Furniture Supply Chains. **BioResources**, v. 16, n. 4, p. 6870–6890, 2021.

WENKER, J. L. et al. Life Cycle Assessment of Wooden Interior Doors in Germany: A Sector-Representative Approach for a Complex Wooden Product According to EN 15804 Methodology. **Journal of Industrial Ecology**, v. 20, n. 4, p. 730–742, 2016.

WENKER, J. L.; RICHTER, K.; RÜTER, S. A Methodical Approach for Systematic Life Cycle Assessment of Wood-Based Furniture. **Journal of Industrial Ecology**, v. 22, n. 4, p. 671–685, 2017.

### APÊNDICE A - LIMITE DO SISTEMA DETALHADO

